

Selvitys kalliotunnelin
kallioteknisestä suunnittelusta
ESISELVITYS



Ulla Sipola, Kalle Hollmén, Päivi Castrén,
Anders Koponen, Tuomas Jokela

Selvitys kalliotunnelin kallioteknisestä suunnittelusta

Esiselvitys

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 47/2018

Liikennevirasto

Helsinki 2018

Kannen kuva: Kuva: Tuomas Jokela / Sitowise Oy

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-602-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Ulla Sipola, Kalle Hollmén, Päivi Castrén, Anders Koponen ja Tuomas Jokela: Selvitys kalliotunnelin kallioteknisestä suunnittelusta. Liikennevirasto, tekniikka- ja ympäristöosasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 47/2018. 151 sivua ja 2 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-602-7.

Avainsanat: tunnelit, kalliorakentaminen, tunnelirakentaminen, rakennesuunnittelu, rakennussuunnittelu, rakennusgeologinen kartoitus

Tiivistelmä

Tässä selvitystyössä käsitellään kalliotunnelien kallioteknistä suunnittelua. Tällä hetkellä Suomessa ei ole olemassa kansallista ohjetta kalliotunnelin kalliotekniseen suunnitteluun (kalliorakennesuunnittelu ja kalliorakennussuunnittelu) eivätkä eurokoodit kata kalliotunnelin suunnittelua.

Yleisesti kalliotekniseen suunnitteluun vaikuttavat lait, asetukset ja ohjeet ovat tiedossa, mutta niitä ei ole aikaisemmin koottu yhtenäiseksi ohjeeksi. Ohjeistukselle on havaittu käytännön tarvetta erityisesti tunnelien kallioteknisen suunnittelun ja sen edellyttämien tutkimusten suunnittelun osalta.

Kalliorakennesuunnittelun tehtävä on kalliorakenteiden louhinta-, lujitus- ja tiivistys-suunnittelu sekä näiden edellyttämien tutkimusten ja seurantamittausten suunnittelu ja tulosten tulkinta. Kalliorakennesuunnittelu vastaa kallion rakenteellisen kestävyys-suunnittelusta.

Tämä selvitystyön tarkoituksena on luoda pohjaa seuraavaksi laadittavalle ohjeelle kalliotunnelin kallioteknisestä suunnittelusta. Valmistuva ohje vähentää tarvetta kohdekohtaisille määrittelyille sekä ohjaa Liikenneviraston kohteiden kalliorakennussuunnittelua. Tavoitteena on myös yhtenäistää alan suunnittelukäytäntöjä sekä helpottaa alan suunnittelijoiden suunnittelutyötä.

Selvitystyössä otetaan kantaa mm. kalliotutkimusten suunnitteluun, kalliorakenteiden suunnitteluun, seurantamittauksien suunnitteluun sekä kallion rakennusgeologiseen kartoitukseen ja sen tulosten dokumentointiin. Selvitystyössä on käyty läpi pohjoismaisen vastaavan ohjeistuksen olemassaoloa. Selvitystyön alussa on listattu kalliotunnelien kallioteknistä suunnittelua koskevat lait, asetukset, ohjeet ja eurokoodit.

Ulla Sipola, Kalle Hollmén, Päivi Castrén, Anders Koponen och Tuomas Jokela: Utredning om bergteknisk planering av bergtunnel. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 47/2018. 151 sidor och 2 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-602-7.

Sammandrag

I detta utredningsarbete behandlas bergteknisk planering av bergtunnlar. För närvarande finns det i Finland ingen nationell anvisning för bergteknisk planering av en bergtunnel (bergstrukturplanering och bergbyggnadsplanering) och eurokoderna täcker inte planering av en bergtunnel.

I regel känner man till de lagar, förordningar och anvisningar som påverkar bergteknisk planering, men dessa har inte tidigare sammanställts till en enhetlig anvisning. Man har upptäckt att det finns ett praktiskt behov av anvisningar särskilt för bergteknisk planering av tunnlar och planeringen av de undersökningar som krävs.

Syftet med bergstrukturplanering är att planera schaktning, förstärkning och tätning samt planera de undersökningar och uppföljningsmätningar som dessa kräver och tolka resultaten. Bergstrukturplaneringen svarar för planeringen av bergets strukturella hållbarhet.

Syftet med det här utredningsarbetet är att skapa en grund för anvisningen som utarbetas härnäst, dvs. bergteknisk planering av en bergtunnel. Anvisningen som snart blir färdig minskar behovet av objektspecifika definitioner samt styr bergbyggnadsplaneringen för Trafikverkets objekt. Målet är också att harmonisera planeringspraxisen i branschen samt att underlätta planeringsarbetet för branschens planerare.

I utredningsarbetet tar man ställning till bl.a. planeringen av bergundersökningar, planeringen av bergkonstruktioner, planeringen av uppföljningsmätningar samt bergets byggnadsgeologiska kartläggning och dokumenteringen av dess resultat. I utredningsarbetet har man gått igenom huruvida det existerar motsvarande nordiska anvisningar. I början av utredningsarbetet finns en förteckning över de lagar, förordningar, anvisningar och eurokoder som gäller bergteknisk planering av bergtunnlar.

Ulla Sipola, Kalle Hollmén, Päivi Castrén, Anders Koponen and Tuomas Jokela: Study of rock engineering design of rock tunnel. Finnish Transport Agency, Engineering and Environment. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 47/2018. 151 pages and 2 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-602-7.

Abstract

This study deals with the design and rock engineering of rock tunnels. In Finland, there are currently no national guidelines (design principles-standards) related to rock tunnel engineering (including rock construction design and rock structure design) neither Eurocodes explicitly describing the process of designing rock spaces.

Predominantly, the majority of rock engineering related laws and regulations are acknowledged by the designers and constitute common practice, but they were never brought together as a unified design methodology standard - guideline. In practice, the necessity of such guideline was remarked particularly during the rock engineering design as well as the required rock investigations prior to design.

The main goals of the design of rock structure engineering refer to the planning of excavation, support and waterproofing of rock space, along with the respective investigation, monitoring and interpretation of the results. The objective of rock structure design refers to the investigation of rock structural durability.

The purpose of this study is to provide the ground for a prospective rock spaces design guidance. This guidance could reduce the requirement of project related (target) specific definitions and it could lead the Finnish Transport Agency's rock planning references.

Additionally, the integration of design practices could facilitate and standardize the designer's mission and working processes. Rock investigation design, rock structure design, rock spaces monitoring design, engineering geological rock mapping and its documentation are all presented in the current study. In addition, all rock tunnel engineering design related laws, instructions, regulations and principles are listed.

Finally, the study has examined the existence of similar guidelines in the Nordic countries, providing a list of the laws, regulations and euro codes for rock engineering of the rock tunnels.

Esipuhe

Tämän selvityksen tavoitteena on selkeyttää ja yhtenäistää kallioteknisen suunnittelun ohjeistusta. Selvitys on tehty Sitowise Oy:ssä joulukuun 2017 ja kevään 2018 aikana.

Selvityksen laadintaan ovat osallistuneet Sitowise Oy:stä Ulla Sipola (pääkirjoittaja), Kalle Hollmén, Anders Koponen, Päivi Castrén, Tuomas Jokela ja Jannis Mikkola. Työtä on ohjannut asiantuntijaryhmä, johon on kuulunut edellä mainittujen lisäksi Jaakko Heikkilä, Markku Äijälä ja Antti Rytönen Liikennevirastosta. Lisäksi Guido Nuijten Pöyry Finland Oy:stä on toiminut yhteyshenkilönä selvityksen laatijoiden ja kansainvälisen eurokoodien päivitystyöryhmän välillä sekä osallistunut työn asiantuntijakommentointiin.

Selvitys kokoaa hajanaisena tietona olevat vaatimukset yhteen. Selvityksen tavoitteena valmistuva ohje vähentää tarvetta kohdekohtaisille määrittelyille sekä ohjaa Liikenneviraston kohteiden kalliorakennussuunnittelua.

Selvityksessä otetaan kantaa mm. kalliotutkimusten suunnitteluun, kalliorakenteiden suunnitteluun, seurantamittauksien suunnitteluun sekä kallion rakennusgeologiseen kartoitukseen ja sen tulosten dokumentointiin. Selvitystyössä on käyty läpi Pohjoismaisen vastaavan ohjeistuksen olemassaoloa. Selvitystyön alussa on listattu kalliotunnelien kallioteknistä suunnittelua koskevat lait, asetukset, ohjeet ja eurokoodit.

Helsingissä elokuussa 2018

Liikennevirasto

Tekniikka- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	12
2	YLEISTÄ	13
2.1	Kalliorakennesuunnittelu ja suunnittelijan pätevyysvaatimukset	14
2.2	Kalliotunneleiden suunnittelun ohjeiden ja määräysten nykytilanne	15
2.2.1	EU-säädökset	15
2.2.2	Eurokoodit	15
2.2.3	Kansallinen lainsäädäntö ja soveltamisohjeet	16
2.2.4	Liikenneviraston ohjeet kalliotunneleille.....	17
2.2.5	Standardit.....	18
2.2.6	Tekninen ohjeisto.....	19
2.2.7	Yleiset laatuvaatimukset	20
2.2.8	Tehtäväluettelot	20
2.2.9	RT-ohjekortit.....	20
2.2.10	Kaupunkien ja kuntien omat ohjeistukset	20
2.2.11	Pohjoismaiden ohjeistus.....	21
2.3	Määritelmät ja lyhenteet	22
2.3.1	Määritelmät	22
2.3.2	Lyhenteet	28
2.4	Tunnelin suunnitteluvaiheet tie- ja ratahankkeissa.....	29
2.4.1	Yleistä	29
2.4.2	Esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaihe.....	31
2.4.3	Yleissuunnitelmavaihe	31
2.4.4	Tie- ja ratasuunnitelmavaihe	32
2.4.5	Rakennussuunnitelmavaihe	32
2.4.6	Rakentamisvaihe	33
2.4.7	Käyttöönotto- ja kunnossapito	33
3	KALLIOTUTKIMUKSET JA KALLIOTUTKIMUSTEN SEKÄ SEURANTAMITTAUSTEN SUUNNITTELU	34
3.1	Yleistä	34
3.2	Tutkimusten suunnittelua koskevat määräykset ja ohjeet	35
3.2.1	Kansallinen lainsäädäntö	35
3.2.2	Liikenneviraston ohjeet.....	36
3.2.3	Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit.....	36
3.2.4	Alan yleiset tekniset ohjeet	37
3.2.5	Kaupunkien ja kuntien ohjeet	38
3.2.6	Pohjoismaiden ohjeistus.....	38
3.3	Kalliotutkimukset eri hankevaiheissa.....	39
3.3.1	Esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaiheen kalliotutkimukset.....	39
3.3.2	Yleissuunnitelmavaiheen kalliotutkimukset	40
3.3.3	Tie- ja ratasuunnitelmavaiheen kalliotutkimukset	40
3.3.4	Rakennussuunnitteluvaiheen kalliotutkimukset.....	41
3.3.5	Rakentamisvaiheen kalliotutkimukset.....	41
3.3.6	Käytön ja kunnossapidon aikaiset kalliotutkimukset/-seurannat	41
3.4	Kalliotutkimusmenetelmät	42
3.4.1	Aiemmin laaditun materiaalin kerääminen	42
3.4.2	Paljastumakartoitus, maastokäynti, rakennusgeologinen kartoitus	42
3.4.3	Seismiset luotaukset	43

3.4.4	Maatutkaluotaus.....	43
3.4.5	Painovoimamittaukset.....	44
3.4.6	Pohjavesitutkimukset	44
3.4.7	Maavastusluotaus.....	44
3.4.8	Porakonekairaus	44
3.4.9	Kallionäytekairaus.....	45
3.4.10	Muut pohjatutkimusmenetelmät	45
3.4.11	Vaaitus, maa- ja kalliopinnan laserkeilaus	46
3.4.12	Vesimenekkikokeet	46
3.4.13	Tutkimusreiän optinen ja akustinen kuvantaminen.....	47
3.4.14	Jännitystilamittaukset	47
3.4.15	Laboratoriokokeet kivelle ja laboratoriokokeet mekaanisten ominaisuuksien testaamiseksi	49
3.4.16	Pohjaveden kemiallinen rasitus.....	49
3.4.17	Kalliomekaaniset seurantaohjelmat ja pohjaveden seuranta	49
3.4.18	Rakosavien (savimineraalit) laboratoriokokeet.....	49
3.4.19	Kalliotutkimusmenetelmät suunnitteluvaiheittain	50
3.5	Kalliotutkimusohjelmien laadinta	51
3.5.1	Kalliotutkimusten suunnittelu, yleistä	51
3.5.2	Kalliotutkimusohjelman rakenne.....	52
3.5.3	Menetelmäkohtaiset lisäykset tutkimusohjelmiin	54
3.5.4	Muita huomioitavat asioita.....	59
3.5.5	Pohjavesitutkimukset	60
3.6	Kalliomekaanisen seurantaohjelman laadinta	61
3.6.1	Painuntaseurantaohjelma.....	65
3.7	Pohjaveden hallintasuunnitelman laadinta	65
3.7.1	Pohjaveden imeytyssuunnitelma.....	65
3.7.2	Vuotovesimittaukset tunnelissa	66
3.8	Tutkimusmäärien arviointi eri suunnitteluvaiheissa	66
3.8.1	Esiselvitysvaihe	66
3.8.2	Yleissuunnitteluvaihe	66
3.8.3	Tie- ja ratasuunnitteluvaihe	67
3.8.4	Rakennussuunnitteluvaihe	67
3.8.5	Rakentamisvaihe	67
3.8.6	Käyttö- ja kunnossapitovaihe.....	68
3.9	Kalliotutkimusten dokumentointi.....	68
4	KALLIORAKENTEIDEN MITOITUS.....	69
4.1	Yleistä	69
4.2	Kalliorakenteiden mitoitusta koskevat määräykset ja ohjeet	69
4.2.1	Kansallinen lainsäädäntö.....	69
4.2.2	Liikenneviraston ohjeet	70
4.2.3	Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit	70
4.2.4	Alan yleiset tekniset ohjeet	70
4.2.5	Kaupunkien ja kuntien ohjeet.....	70
4.2.6	Pohjoismainen ohjeistus.....	71
4.2.7	Muu ulkomainen kirjallisuus	72
4.3	Kalliolaadun määrittäminen	72
4.3.1	ISO-maa- ja kallioluokitus.....	72
4.3.2	Q-luokitus	73
4.3.3	GSI -luku	74
4.3.4	RG-luokitus.....	74

	4.3.5	Muita kalliolaadun määrittämenetelmiä	76
4.4		Kalliomekaaniset mitoituksetmenetelmät	77
	4.4.1	Empiirinen viitekohdemenettely (taulukkomitointi)	77
	4.4.2	Analyttiset menetelmät.....	78
	4.4.3	Numeeriset laskennalliset menetelmät	79
4.5		Kalliorakenteiden mitointi eri hankevaiheissa.....	80
4.6		Määritettävät parametrit.....	82
4.7		Louhittavien tilojen suunnittelu	83
4.8		Kallion mekaanisten lujitusrakenteiden suunnittelu	84
	4.8.1	Pultitus.....	84
	4.8.2	Ruiskubetoni	85
	4.8.3	Kallioverkotukset	88
	4.8.4	Materiaaliominaisuudet ja säilyvyys	88
	4.8.5	Paisuvahilaisten savien huomioiminen lujitusrakenteissa	89
5		VUOTOVESIEN HALLINTA JA TIIVISTYSSUUNNITTELU	90
5.1		Yleistä	90
5.2		Vuotovesien hallintaa ja tiivistyssuunnittelua koskevat määräykset ja ohjeet	91
	5.2.1	Kansallinen lainsäädäntö	91
	5.2.2	Liikenneviraston ohjeet.....	92
	5.2.3	Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit.....	92
	5.2.4	Alan yleiset tekniset ohjeet	92
	5.2.5	Kaupunkien ja kuntien ohjeet	93
	5.2.6	Pohjoismainen ohjeistus.....	93
	5.2.7	Muu ulkomainen kirjallisuus.....	94
5.3		Vuotovesien hallinnan periaatteet eri hankevaiheissa.....	95
5.4		Ympäristöselvitykset	96
	5.4.1	RATO 18 vaatimukset.....	96
5.5		Tiivistyssuunnittelu	96
	5.5.1	Tiiviysluokat.....	96
	5.5.2	Tiivistysmenetelmät	97
	5.5.3	Injektointitarpeen arviointi	99
	5.5.4	Esi-injektointisuunnittelu.....	102
	5.5.5	Jälki-injektointisuunnittelu	110
	5.5.6	Injektointisuunnitelman sisältö	111
5.6		Kuivatussuunnittelu.....	111
	5.6.1	Vedeneristys.....	111
	5.6.2	Ruiskubetonoinnin salaojat	111
	5.6.3	Vuotoa ohjailevien tekstiilien käyttö	114
	5.6.4	Pohjan salaojat	115
5.7		Radonin hallinta tunnelissa kallioteknisin ratkaisuin	115
6		KALLIOTUNNELIN RAKENNUSGEOLOGINEN KARTOITUS.....	116
6.1		Yleistä	116
6.2		Kartoitusta koskevat määräykset ja ohjeet	116
	6.2.1	Kansallinen lainsäädäntö	116
	6.2.2	Liikenneviraston ohjeet.....	117
	6.2.3	Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit.....	117
	6.2.4	Alan yleiset tekniset ohjeet	117
	6.2.5	Kaupunkien ja kuntien ohjeet	118
	6.2.6	Pohjoismainen ohjeistus.....	118
	6.2.7	Muu ulkomainen kirjallisuus	118

6.3	Kalliotunnelin rakennusgeologisen kartoituksen toteutus.....	119
6.3.1	Työnaikainen rakennusgeologinen kartoitus.....	119
6.4	Tunnelin rakennusgeologisen kartoituksen tulosten dokumentointi.....	120
7	KALLIOTEKNISET SUUNNITELMAT	122
7.1	Yleistä	122
7.2	Kallioteknisiä suunnitelmia koskevat määräykset ja ohjeet.....	122
7.2.1	Kansallinen lainsäädäntö.....	122
7.2.2	Liikenneviraston ohjeet	123
7.2.3	Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit	123
7.2.4	Alan yleiset tekniset ohjeet	123
7.2.5	Kaupunkien ja kuntien ohjeet.....	123
7.2.6	Pohjoismainen ohjeistus.....	124
7.3	Kallioteknisten suunnitelmien periaatteet eri hankevaiheissa	124
7.4	Suunnitelma-asiakirjojen sisältö.....	126
7.4.1	Kalliotekniset suunnitelmat esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaiheissa	126
7.4.2	Kalliotekniset suunnitelmat yleissuunnitelmavaiheessa.....	126
7.4.3	Kalliotekniset suunnitelmat tie- ja ratasuunnitelmavaiheessa	127
7.4.4	Kalliotekniset suunnitelmat rakennussuunnitelmavaiheessa	129
7.4.5	Kalliotekniset suunnitelmat rakentamisvaiheessa	132
7.5	Suunnittelun laadunvarmistus.....	133
7.5.1	Suunnittelijan laadunvarmistus	133
7.5.2	Liikenneviraston taitorakenteiden tarkastusprosessi	133
7.6	Tietomallipohjainen suunnittelu.....	135
8	PAKKASEN HUOMIOIMINEN KALLIOTUNNELIN KALLIOTEKNISESSÄ SUUNNITTELUSSA.....	137
8.1	Yleistä	137
8.2	Pakkasen huomioimista koskevat määräykset ja ohjeet.....	137
8.2.1	Kansallinen lainsäädäntö.....	137
8.2.2	Liikenneviraston ohjeet	137
8.2.3	Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit	138
8.2.4	Alan yleiset tekniset ohjeet	138
8.2.5	Kaupunkien ja kuntien ohjeet.....	138
8.2.6	Pohjoismainen ohjeistus.....	138
8.3	Kallio ja pakkasen	138
8.4	Kallion mekaaniset lujitusrakenteet ja pakkasen.....	138
8.4.1	Kalliopulttit	138
8.4.2	Ruiskubetoni	139
8.5	Ruiskubetonoinnin salaojat	141
9	VIIME VUOSINA TOTEUTETUT LIIKENNETUNNELIT JA NIISTÄ SAATUJA SUUNNITTELUKOKEMUKSIA	142
9.1	Valtatie VT 12.....	142
9.1.1	Tampereen Rantaväylä, Rantatunneli	142
9.2	VT7 (E18) tunnelit, Helsinki-Vaalimaa.....	144
9.2.1	E18 Vaalimaan tunneli.....	144
9.2.2	E18 Markkinamäen tunneli	145
9.2.3	E18 Kolsilan tunneli	145
10	TUNNELEIDEN HUOLTOKIRJA	146

11	ARKISTOINTI JA REKISTERIEN PÄIVITYS.....	147
11.1	Taitorakennerekisteri	147
11.1.1	Dokumentoinnin yleiset vaatimukset.....	147

LÄHTEET	148
---------------	-----

LIITTEET

Liite 1	Esimerkki Q-lujitusjärjestelmän käyttämisestä
Liite 2	Esimerkki tunnelin injektointikriteerin asettamisesta

1 Johdanto

Liikennevirastolla on kattava ohjeistus liikenneväylillä sijaitsevien tie- ja rautatietunneleiden suunnitteluun alkaen alkuvaiheen tutkimuksista jatkuen aina käytön aikaiseen turvallisuuteen ja käyttöön turvaamiseen. Täydentävälle ohjeistukselle on havaittu käytännön tarvetta erityisesti tunnelien kallioteknisen suunnittelun ja sen edellyttämien tutkimusten suunnittelun osalta. Vastaava ohjeistus on olemassa esimerkiksi geotekniseen suunnitteluun ja tunnelin rakennetekniseen suunnitteluun.

Tietunneleiden rakenneteknisten ohjeiden (Liikenneviraston ohje 34/2017) lähtökohdiana on, että kalliotunneli on lujitettu ja tiivistetty. Tässä selvityksessä otetaan kantaa, miten kalliomateriaalin lähtötiedoista suunnitellaan rakenneteknisten ohjeiden lähtökohtana oleva tiivis ja kalliomekaanisesti stabiili tunneli.

Kalliotunnelin suunnittelua koskeva ohjeistus on tällä hetkellä hajanainen. Tietunnelin suunnitteluohjetta ei ole julkaistu, sillä se jäi luonnosversioksi vuonna 2005. Osa tietunnelin suunnitteluohjeen kohdista on siirretty muihin Liikenneviraston ohjeisiin. Ohjeen puute vaikeuttaa suunnittelua, sillä hankekohtaisten vaatimusten määrä tai määrittely lisääntyy. Tämän selvityksen tarkoituksena on selkeyttää ja yhtenäistää kallioteknisen suunnittelun ohjeistusta. Alalla on havaittu selkeä puute varsinaisen suunnittelutyön sisällön ohjeistuksessa ja on laadittava rakentamista yhtenäistävä ohje, sillä InfraRYLissä määritellään vain lopputuotteen yleinen laatutaso. Ratateknisten ohjeiden (RATO) tunneleita käsittelevä osa 18 on päivittynyt ja tullut voimaan 14.6.2018.

Tämän selvityksen tarkoitus on toimia keskeisenä lähtötietona myöhemmin laadittavalle ohjeelle. Selvitys on sisällöltään ohjetta laajempi ja perusteellisempi, mutta vähemmän kantaaottava. Selvityksen ulkopuolelle on rajattu muut tunnelityypit kuin kalliotunnelit (esim. betonitunnelit), muu tunnelitekniikka (esim. LVI), tunneliturvallisuus, riskienhallinta ja tunnelin hallinnointiin liittyvät kysymykset (esim. tunnelin päälle rakentaminen). Selvityksessä on ohjeistettu myös kalliotunnelin louhitun pinnan rakennusgeologinen kartoitus ja loppuosaan on kerätty viime vuosina valmistuneista liikennetunneleista saatuja kokemuksia.



Kuva 1. Hiidenkallion tunneli. Kuva: Kalle Hollmén.

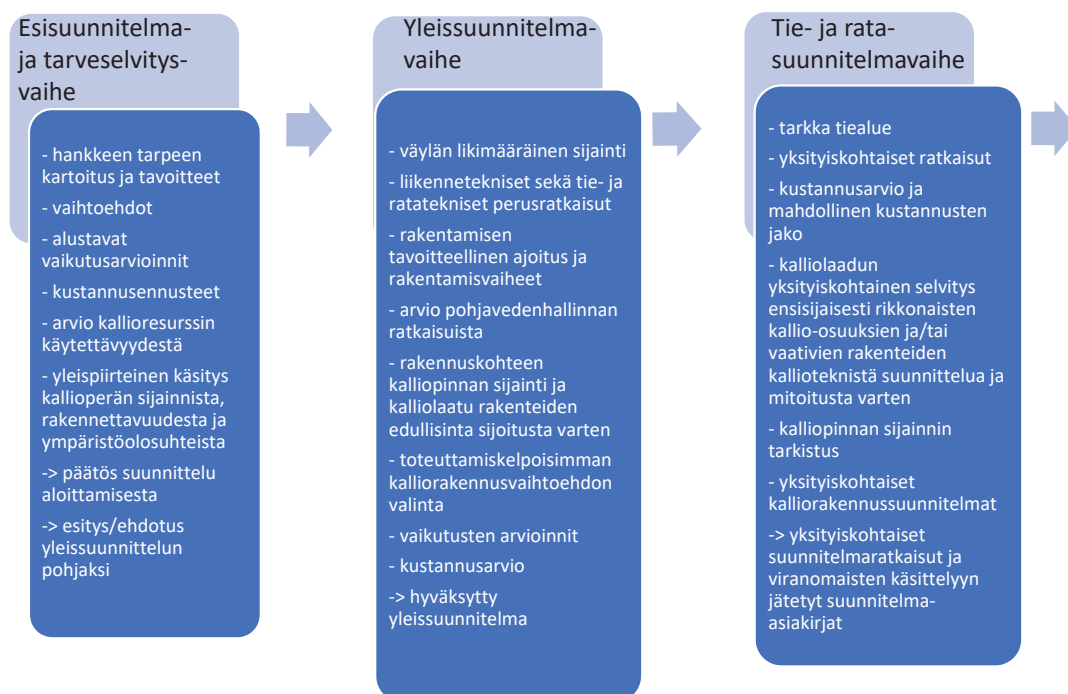
2 Yleistä

Kalliotunneleiden suunnittelua tehdään valitsemalla pieniä säännöksiä, usein geotekniikkaa koskevia, sieltä täältä ja yhdistelemällä ne vakiintuneiden käytäntöjen mukaiseksi hankekohtaisiksi suunnitteluperusteiksi. Tulkintaa vaikeuttaa koko kalliorakennesuunnittelun puuttuminen esimerkiksi maankäyttö- ja rakennuslain erikoissuunnittelualoista, jolloin kalliorakenteisiin sovelletaan vaihtelevasti geoteknisen suunnittelun ja rakennesuunnittelun säännöstöjä. Yleisesti kalliotekniseen suunnitteluun vaikuttavat lait, asetukset ja ohjeet ovat alan suunnittelijoiden tiedossa, mutta niitä ei ole aikaisemmin koottu yhtenäiseksi ohjeksi. Kalliotunneleiden kallioteknistä suunnittelua (kalliorakennesuunnittelu ja kalliorakennussuunnittelu) ohjaava kansallisen ohjeen puute on ilmeinen.

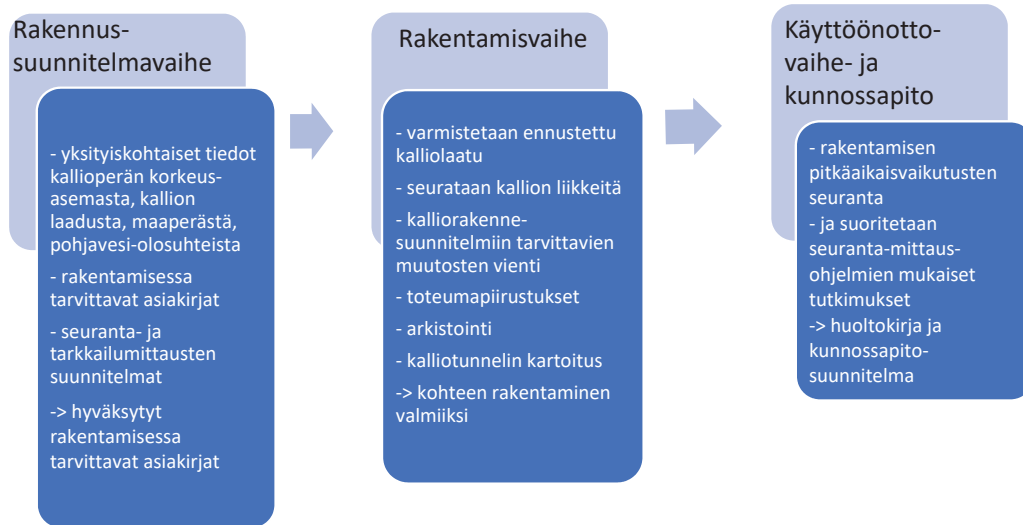
Kalliorakennussuunnitteluun kuuluu ko. suunnitteluvaiheen mukaisessa laajuudessa rakennuskohteen:

- kalliomekaaninen mitoitus ja suunnittelu
- kalliorakenteiden mitoitus ja suunnittelu
- louhinnan mitoitus ja suunnittelu
- lujituksen mitoitus ja suunnittelu
- tiivistyksen mitoitus ja suunnittelu
- kuivanapidon mitoitus ja suunnittelu
- ympäristön suojauksen mitoitus ja suunnittelu

Kalliotunnelin suunnitteluvaiheet ja sisällöt on kuvattu alla olevissa kuvissa (Kuva 2 ja Kuva 3).



Kuva 2. Kalliorakennussuunnittelun yleispiirteinen sisältö esi-, yleis- ja tie-/ratasuunnitelmavaiheissa.



Kuva 3. Kalliorakennussuunnittelun yleispiirteinen sisältö rakennussuunnitelma-, rakentamis- ja käyttöönottovaiheissa.

2.1 Kalliorakennesuunnittelu ja suunnittelijan pätevyysvaatimukset

Kalliorakennesuunnittelun tehtävä on kalliorakenteiden louhinta-, lujitus- ja tiivistys-suunnittelu sekä näiden edellyttämien tutkimusten ja seurantamittausten suunnittelu ja tulosten tulkinta. Kalliorakennesuunnittelu vastaa kallion rakenteellisen kestävyys-suunnittelusta. Kalliorakennesuunnittelijan tehtäväksi voidaan määrittää myös kalliotilan toiminnallinen suunnittelu, jolloin kalliorakennesuunnittelija toimii kalliorakennussuunnittelijana.

Kalliorakennussuunnitteluun on laadittu tehtäväluettelo KAT18, joka on saatavissa Rakennustieto Oy:n julkaisemassa RT-ohjekorttisarjasta tunnuksella RT 10-11296.

Liikennevirasto ei toistaiseksi ole systemaattisesti esittänyt kohteilleen kalliorakennesuunnittelijan pätevyysvaatimusta tai vaatimusta rekisteröidystä pätevydestä, kuten esimerkiksi pohjarakennesuunnittelijalle on esitetty (ks. https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf2/pohjarakennesuunnittelijan_patevyys.pdf).

Fise Oy:n uudistettua vuosien 2015, 2016 ja 2018 aikana kalliorakennesuunnittelijan päteväinnin rekisteröinnin vaatimukset, suositellaan rekisteröidyn pätevyysvaatimuksen asettamista kalliotunneleiden suunnitteluun kaikkiin hankevaiheisiin, sillä Liikenneviraston kohteet ovat harvoin rakennusluvan alaisia kohteita. Myös ensimmäisten suunnitteluvaiheiden osalta edellytys suunnittelijan pätevydestä kalliorakennussuunnitteluun on oleellinen, sillä usein jo hankkeen alkuvaiheessa vaikutetaan esim. liikennetunnelin linjaukseen, joka yhdessä vaikuttavien kallio-olosuhteiden kanssa johtaa tunnelin runkorakennusratkaisun vaativuuteen ja toteutettavuuteen sekä rakentamiskustannuksiin.

FISEn pätevyyspalvelusta löytyy kalliorakennussuunnittelijat, joilla on Fise Oy:n rekisteröimä pätevyys:

<http://fise.fi/patevyysrekisteri/?link=%2Fwww%2Fsuomi%2Fpatevyysrekisteri%2Fsuunnittelu%2Fuudisrakentaminen%2Fkalliorakenteet%2F>

SKOL ry:n kannanotto FISE-pätevyyksien vaatimisesta julkisissa hankinnoissa (MRL:n ulkopuoliset pätevydet):

<https://skol.teknologiateollisuus.fi/uutiset/fisen-uudet-p%C3%A4tevydet-ja-hinnoittelu>

2.2 Kalliotunneleiden suunnittelun ohjeiden ja määräysten nykytilanne

Tässä kappaleessa on listattu kootusti kaikki kalliotunneleiden suunnittelua koskevat ohjeet ja määräykset. Tässä selvitystyössä jokaisen asiaotsikon alla on erikseen vielä kerrottu juuri ko. aihetta koskevat ohjeet ja määräykset. Tarkkaa pätevyysjärjestystä asioille ei ole määritelty ja lopullisessa ohjeessa tulisikin ottaa kantaa lakien ja asetusten sekä Liikenneviraston ohjeiden ulkopuolisten ohjeiden asemaan.

2.2.1 EU-säädökset

- tunneli-YTE (rautatiet)

<https://publications.europa.eu/fi/publication-detail/-/publication/be762c95-81ca-11e4-89f7-01aa75ed71a1/language-fi>

- tunnelidirektiivi (tietunnelit)

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf/liikenteenhallinta/liikenteenohjaus/tietunnelidirektiivi_2004.pdf

- o Yli 500 metristen TEN-tieverkolle sijoittuvien tunneleiden minimi-turvallisuusvaatimukset tulevat niin sanotusta EU:n tunnelidirektiivistä. Tunnelidirektiivin vaatimuksia pyritään noudattamaan mahdollisimman pitkälle myös muulle maantieverkolle sijoittuvissa yli 500 metrisissä tietunneleissa ja soveltuvin osin myös lyhyemmissä tietunneleissa.

2.2.2 Eurokoodit

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja. Eurokoodiyhteensopivat säädökset tulivat voimaan 1.9.2014. Tämän jälkeen suunnittelussa käytetään eurokoodeja yhdessä kansallisten liitteiden kanssa.

Eurokoodit sisältävät varmuuden määrittämisperiaatteet erilaisille kuormille, kuten hyöty-, lumi- ja tuuli-, lämpö-, onnettomuus- ja nosturikuormat.

Standardien soveltaminen eri maissa vaatii kansallisten liitteiden (national annex (NA)) käyttämistä. Suomessa kansallisten liitteiden laatimisesta vastaa talonrakentamisen osalta Ympäristöministeriö ja siltojen osalta Liikennevirasto.

Eurokoodi-järjestelmän pääosat ovat:

- EN 1990 Eurokoodi 0: Suunnittelun perusteet
- EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormitukset
- EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu
- EN 1993 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu
- EN 1994 Eurokoodi 4: Teräs-betoniliittorakenteiden suunnittelu
- EN 1995 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu
- EN 1996 Eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu

- EN 1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu
- EN 1998 Eurokoodi 8: Rakenteiden suunnittelu kestävyys suhteen maanjäristyksessä
- EN 1999 Eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu

Yhteensä standardeja on 58.

Nykyisellään eurokoodit eivät ota kantaa kalliotunnelin suunnitteluun. Eurokoodit ottavat toistaiseksi huomioon kalliorakentamisen ns. kovan kiven alueella, mutta eivät varsinaista tunnelisuunnittelua ollenkaan. Kalliorakennussuunnitteluun yleisesti niitä voi jotenkin soveltaa ja tutkimuksien suunnitteluun varsin hyvin. Eurokoodi 7 osat ovat seuraavat:

- SFS-EN 1997 Geotekninen suunnittelu
 - o Osa 1: yleiset säännöt
 - SFS-EN 1997-1 + A1 + AC
 - o Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus
 - SFS-EN 1997-2 + AC

2.2.2.1 Eurokoodien kansalliset soveltamisohjeet

Suomessa Eurokoodi 7:lle on käytössä kaksi kansallista liitettä: ympäristöministeriön ja liikenne- ja viestintäministeriön. Liikenneviraston ohje 13/2017 (NCCI7) koskee liikenne- ja viestintäministeriön kansallisen liitteen mukaista geoteknistä suunnittelua.

- Kansallinen liite (LVM) standardiin SFS-EN 1997-1: 2004 ja sen korjaus AC:2009: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt, Soveltaminen infrarakenteisiin
<http://www.eurocodes.fi/1997/1997-1/NA%20SFS-EN1997-1-LVM.pdf>
- Liikenneviraston ohje 13/2017, Eurokoodin soveltamisohje- Geotekninen suunnittelu- NCCI 7
https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf

2.2.3 Kansallinen lainsäädäntö ja soveltamisohjeet

Kalliotekninen suunnittelu perustuu lakeihin, asetuksiin ja ohjeisiin. Ajantasainen lainsäädäntö löytyy Finlexin sivustolta. Alle on kerätty lakeja, jotka tyypillisesti tulee huomioida kalliotunnelin kallioteknisessä suunnittelussa.

Maankäyttöä ja rakentamista koskevaa lainsäädäntöä ja ohjeita on koottu sivustolle:

http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus

Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999):

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Maankäyttö- ja rakennusasetus (895/1999)

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990895>

Pohjarakenteiden suunnittelu on koottu ohjeeseen:

<http://www.ym.fi/download/noname/%7B687245F6-C824-413F-BB52-7A9DF0EDC210%7D/137126>

Ympäristöministeriön asetusta pohjarakentamisesta ja kantavista rakenteista sovelletaan kalliorakenteiden suunnitteluun soveltuvin osin.

- Ympäristöministeriön asetusta pohjarakenteista (465/2014):
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140465>
- Ympäristöministeriön asetusta kantavista rakenteista (477/2014):
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140477>

Suunnittelua ja valvontaa koskeva lainsäädäntö on sivulla:

http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta

Valtioneuvoston asetus rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokkien määräytymisestä (214/2015)

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150214>

Ympäristöministeriön ohje rakennusten suunnittelijoiden kelpoisuudesta:

<http://www.ym.fi/download/noname/%7B5E62D05B-5376-4191-A7B8-3EFCF33F5918%7D/109133>

Ympäristöministeriön asetus rakentamista koskevista suunnitelmista ja selvityksistä (216/2015)

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150216>

Muut kalliotunnelin suunnittelua koskevat lait on esitetty myöhemmin asiaa koskevissa luvuissa.

2.2.4 Liikenneviraston ohjeet kalliotunneleille

Liikennevirasto ohjeet löytyvät kootusti täältä:

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf7/lo_julkaisuluettelo_web.pdf

Kalliotunnelin lähtötietojen hallintaa koskevia Liikenneviraston ohjeita:

- Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, Suunnitteluvaiheen ohjaus, Liikenneviraston ohje 10/2015.
- Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot, Mittausohje, Liikenneviraston ohje 18/2017
- Maastotietojen hankinta, Toimintaohjeet, Liikenneviraston ohje 19/2017
- Liikenneviraston ohjeita 12/2017, Tie- ja ratahankkeiden inframalliohje
- Liikenneviraston ohjeita 21/2014, Taitorakenteiden suunnittelun lähtötieto-ohje
- Liikenneviraston ohjeita 23/2012, Suunnitelmatiedon hallinta -toimintaohje

Kalliotunnelin suunnittelua koskevia Liikenneviraston ohjeita:

- Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastusohje, Liikenneviraston ohje 30/2014
- Taitorakenteiden tarkastusohje, Liikenneviraston ohje 17/2013

Kalliotunnelin tekniikan suunnittelua koskevia Liikenneviraston ohjeita:

- Tietunnelin rakennetekniset ohjeet, Liikenneviraston ohje 34/2017
- Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu – NCCI 7, Liikenneviraston ohje 13/2017
- Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2, Liikenneviraston ohje 31/2017

Kalliotunnelin toteutusta koskevia Liikenneviraston ohjeita:

- Louhintatyöt rautatietunnelin läheisyydessä, Liikenneviraston ohje 23/2013

Kalliotunnelin hallinnointia ja käyttöturvallisuutta koskevia Liikenneviraston ohjeita:

- Tietunnelien hallinnointia ja turvallisuutta koskevat määräykset ja ohjeet, Liikenneviraston ohje 33/2016
- Tietunnelin turvallisuusasiakirjojen laadinta, Liikenneviraston ohje 32/2015
- Tietunnelien turvalliseen poistumiseen ja poikkeustilanteiden viestintään liittyvien järjestelmien suunnitteluohje, Liikenneviraston ohje 16/2016
- Taitorakenteiden tarkastusohje, Liikenneviraston ohje 17/2013
- Tietunnelin tarkastukset – yleiset periaatteet ja ohjeet, Liikenneviraston ohje 3/2016
- Tietunnelin liikenteenhallinnan toimintaperiaatteiden laadinta, Liikenneviraston ohje 20/2018
- Tietunnelin teknisten järjestelmien tarkastaminen, Liikenneviraston ohje 27/2015
- Tunnelin tarkastuskäsikirja (xx-2017, tekeillä)

2.2.4.1 Muut tunneleita koskevat Liikenneviraston ohjeet

- Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 18 Rautatietunnelit (Liikennevirasto 2018), Liikenneviraston ohjeita 19/2018

2.2.4.2 Muut kallioteknisessä suunnittelussa sovellettavat Liikenneviraston ohjeet ja oppaat

- Geolujitetut maarakenteet, Liikenneviraston oppaita 02/2012
- Maaväylien päällerakentaminen, Liikenneviraston ohje 29/2015
- Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu, Liikenneviraston ohje 9/2010
- Ratatekniset piirustusohjeet, Liikenneviraston ohje 14/2012

2.2.5 Standardit

Varsinaisesti kalliotunnelin suunnittelua koskevia standardeja ei ole. Liittyvät standardit on esitetty myöhemmin asiaa koskevissa luvuissa.

2.2.6 Tekninen ohjeisto

Yleistä hyvää rakentamistapaa varten on ammattijärjestöt laatineet omia teknisiä ohjeistojaan, joita voidaan käyttää sekä suunnittelua että työn toteuttamista ohjaavina ohjeistuksina.

- Betoniyhdistys ry (By)
 - o Ruiskubetoniohjeet By63/2015
 - o Kallion injektointi By53/2006
 - o Betoninormit By65/2016
 - o Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu By68/2016
- Rakennusinsinööriliitto (RIL)
 - o RIL 253-2010 Rakentamisen aiheuttamat tärinät
 - o RIL266-2014 Kalliopultitusohje
 - o RIL 169-1987 Kalliotilojen rakennusohjeet
 - o RIL 98 Maa- ja kalliorakennus. Suomen rakennusinsinöörien liitto. 1976.
 - o RIL 154-1 Tunneli- ja kalliorakennus I. Suomen rakennusinsinöörien liitto. 1987.
 - o RIL 154-2 Tunneli ja kalliorakennus II. Suomen rakennusinsinöörien liitto. 1987.
- VTT
 - o Rakennusalan kallioluokitus, VTT, Geoteknillinen laboratorio, tiedonanto 12. 1974.
 - o Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen, VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 25. 1976.
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys (SGY)

https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/geoteknisen_mittaamisen_ja_monitoroinnin_olennaiset_kasitteet_ja_periaatteet_6-11-2017_julkaisu.pdf
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/pohjatutkimusmerkinnat-2005.pdf>

 - o Kairausoppaat
 - Kairausopas 1, painokairaus, tärykairaus, heijarikairaus:
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/kairausopas-1-painokairaus-taerykairaus-heijarikairaus.pdf>
 - Kairausopas 2, siipikairaus:
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/kairausopas-2.pdf>
 - Kairausopas 3, maanäytteiden ottaminen geoteknillisiä tutkimuksia varten:
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/kairausopas-3-maanaeytteiden-ottaminen-geoteknillisia-tutkimuksia-varten.pdf>
 - Kairausopas 4, pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen:
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/kairausopas-4.pdf>
 - Kairausopas 5, porakonekairaus:
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/kairausopas-5.pdf>
 - Kairausopas 6, CPTU-puristinkairaus, puristinheijarikairaus:
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/kairausopas-6-cptu-puristinkairaus-puristin-heijarikairaus.pdf>
- Norjan Geoteknillisen Instituutin (NGI) Q-lukumenetelmä

<https://www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise-A-Z/Engineering-geology-and-rock-mechanics/Q-system>
<https://www.ngi.no/eng/content/download/4014/431191/version/1/inLanguage/nor-NO/file/Handbook%20The%20Q-system%20mai%202015%20nettutg.pdf>

2.2.6.1 Tutkimus ja seuranta

Kalliotutkimusten suunnittelua koskevat määräykset ja ohjeet:

- Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista (465/2014)
- Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus (10.1.2018)
- Liikennevirasto 10/2015, Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, suunnitteluvaiheen ohjaus.
- Liikennevirasto 18/2017, Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot, Mittausohje
- Liikenneviraston ohje 19/2017, Maastotietojen hankinta – Toimintaohje.
- Liikennevirasto ohje 12/2017: Tie- ja ratahankkeiden inframalliohje
- Eurokoodi SFS-EN 1997-2
- ISRM: The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring 2007-2014
- Suomen Geoteknillisen yhdistyksen (SGY) kairausoppaat
- Pohjatutkimusmerkinnät SGY 201/2005
- Geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin olennaiset käsitteet ja periaatteet
- Infra-pohjatutkimusformaatti SGY ohje 204
- Rakennusalan kallioluokitus (Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, geoteknillinen laboratorio, tiedonanto 12, 1974)
- Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen (Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 25, 1976)
- SFS-EN ISO 14689-1. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Kallion tunnistaminen ja luokitus. Osa 1: tunnistaminen ja kuvaus.
- Yleiset inframallivaatimukset: <https://buildingsmart.fi/infrabim/yiv/>.

2.2.7 Yleiset laatuvaatimukset

- Kalliotilojen rakentamisen yleiset laatuvaatimukset on esitetty InfraRYLissä. InfraRYL (Infrarakenteiden yleiset laatuvaatimukset, Osa 1, Väylät ja alueet). InfraRYLin kalliorakentamista koskeva luku on päivitetty viimeksi kesäkuussa 2018.

2.2.8 Tehtäväluettelot

- RT-ohjekortti 10-11296, Kalliorakennussuunnittelun tehtäväluettelo KAT18

2.2.9 RT-ohjekortit

- RT-ohjekortti RT 91-10655 Kalliotilat

2.2.10 Kaupunkien ja kuntien omat ohjeistukset

2.2.10.1 Helsinki

Helsingin kaupungilla ei ole varsinaista kalliorakennesuunnittelun ohjeistusta. Kaupunki on julkaissut yleisen turvallisuusselvityksen maanalaisista toiminnoista, joka esittelee kallioteknisiä asioita, mutta ei ota siihen kantaa suunnittelua ohjaavasti. Lisäksi Helsingin kaupungin taitorakenteiden suunnitteluohjeessa ja tietomallinnusohjeessa on mainittu tunnelit, mutta ei ole annettu kallioteknistä suunnittelua ohjaavia asioita.

https://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/maanalainen/Maanalaisten_toimintojen_yleinen_turvallisuusselvitys.pdf
https://www.hel.fi/static/hkr/ohjeita_suunnittelijoille/taitorakenteiden_suunnitteluohje_20170320.pdf
https://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/ohjeet/taitorakenteet_tietomallinnusohje.pdf

- Helsingin kaupungin maa- ja kallioperäyksikön julkaisut 1973-2017
 - o Maa- ja kallioperäyksikkö julkaisee geo- ja kallioteknisen alan kehityshankkeista ja menetelmistä kertovia julkaisuja. Julkaisut sisältävät paljon alan teknisiä selvityksiä ja esittelyluonteisia ohjeita, mutta ei varsinaisia suunnitteluohjeita tai määräyksiä

<https://www.hel.fi/helsinki/fi/asuminen-ja-ymparisto/tontit/maa-ja-kalliopera/geotekniikka/julkaisut>

2.2.10.2 Muut kaupungit ja kunnat

Muiden kaupunkien osalta ei tunnistettu erillistä ohjeistusta kalliotilojen tai -tunneleiden suunnitteluun.

2.2.11 Pohjoismaiden ohjeistus

2.2.11.1 Ruotsi

Ruotsin liikennevirasto on määrittänyt tie- ja rautatietunneleiden laatuvaatimukset sekä antanut ohjeita ja suosituksia seuraavissa julkaisuissa:

- Trafikverket: TDOK 2016:0231 Krav Tunnelbyggande
 - o määrittelee tunnelin laatuvaatimukset Ruotsin liikenneviraston tie- ja rautatiehankkeissa.

<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=cc943b78-c6d5-4d3f-ba48-a82e45af805d>

- Trafikverket: TDOK 2016:0232 Råd Tunnelbyggande
 - o täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla

<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=1f74d32e-2394-4523-87dc-670c7f4a8foo>

Lisäksi Ruotsissa on aktiivista alan teknisten ohjeiden julkaisutoimintaa, esim. Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo).

2.2.11.2 Norja

Norjan tielaitos on määrittänyt tietunneleiden laatuvaatimukset sekä antanut ohjeita ja suosituksia seuraavissa julkaisuissa:

- Statens vegvesen: Håndbok N500 Vegtunneler
 - o Norjan tielaitoksen ohje joka määrittelee tietunnelin laatuvaatimukset

https://www.vegvesen.no/_attachment/61913

- Statens vegvesen: Håndbok V520 Tunnelveiledning
 - o täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla

https://www.vegvesen.no/_attachment/1597247/binary/1144089

Myös Norjassa on aktiivista alan teknisten ohjeiden julkaisutoimintaa, julkaisijoina esim. Statens vegvesen, Norsk Betongforening, Norges Geotekniske Institutt (NGI) ja Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF).

2.2.11.3 Tanska

Ohjeistusta Tanskasta ei löydetty tämän selvitystyön puitteissa.

2.2.11.4 Islanti

Ohjeistusta Islannista ei löydetty tämän selvitystyön puitteissa.

2.3 Määritelmät ja lyhenteet

2.3.1 Määritelmät

Ajotunneli on tunneli, jota pitkin kohteeseen pääsee ajoneuvolla muualta kuin tunnelin suuaukon kautta. Ajotunneli voi olla osa poistumisreittiä.

Ajoneuvotunneli on ajoneuvoliikenteelle tarkoitettu tunneli.

Ennakkopultti on kallionurkkaan tai kallioreunaan ennen louhintaa asennettava lujituspultti. Ennakkopultteja voidaan asentaa myös anturoiden tai pilarien alla olevaan kalliomassaan ennen louhintaa.

Haarniskaraot ovat syntyneet hiertoliikkeen vaikutuksesta. Haarniskaraot muodostavat kallioon heikkouskohdan, joka voi aiheuttaa sortumisen.

Hallintoviranomainen on kansallisesti, alueellisesti tai paikallisesti nimitettävä viranomainen, joka vastaa sen varmistamisesta, että kaikkia tunnelien turvallisuuteen liittyviä näkökohtia ja tunneliturvallisuudirektiiviä 2004/54/EY tai komission asetusta rautatietunnelin turvallisuudesta 1303/2014 noudatetaan.

Henkilöliikennetunneli on pelkästään henkilöliikenteen käytössä oleva tunneli.

Holvikorkeus on tunnelipoikkileikkauksen lakipisteen korko.

Huoltotunneli on huoltoliikenteelle tarkoitettu tunneli.

InfraRYL on infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset.

Injektointi on kalliorakenteen tiivistämistä. Sementtipohjaista injektointiainetta tai kemiallista injektointiainetta työnnetään paineella kallioon porattuun reikään, josta se tunkeutuu kallion rakoihin ja kovettuu. Ennen louhintaa suoritettavaa injektointia kutsutaan esi-injektoinniksi ja louhinnan jälkeen tehtävää injektointia jälki-injektoinniksi. Vedentäviysvaatimuksista riippuen kalliorakennesuunnittelija määrittelee käytettävän menetelmän. Esi-injektointi on injektointimenetelmistä yleensä tehokkaampi. Jälki-injektointia voidaan käyttää ilman esi-injektointia tai puutteellisen esi-injektoinnin korjaamisessa.

Kaksoistunnelin on kaksiputkinen tunneli, joka muodostuu kahdesta rinnakkaisesta tunneliputkesta.

Kaksisuuntainen liikenne: samalla ajoradalla vastakkaisiin suuntiin virtaava liikenne.

Kallioavoleikkaus on louhittu kallioseinä.

Kalliokaivanto on kallioon louhittu kuoppa, jolla tehdään tilaa rakennettavan rakennuksen tai sen rakenteiden kalliopinnan alapuolisille osille.

Kalliokuilu on pystysuunnassa tunnelitiloihin liittyviä ilmanvaihto- ja savunpoistoreittejä, tekniikkakuiluja ja/tai huolto-, poistumis- ja pelastusreittejä. Kalliokuilun pääasiallinen kantava rakenne on tiivistetty ja lujitettu kallio.

Kalliomekaniikka on sovellettua ja teoreettista tiedettä kallion mekaanisesta käyttäytymisestä. Kalliomekaniikka on mekaniikan haara, joka tutkii kallion reaktioita erilaisiin voimakenttiin.

Kallion kova tarkoittaa louhitun kalliopinnan ulkonemaa teoreettisen louhinnan poikkileikkauksen sisäpuolelle.

Kallion ryöstymä tarkoittaa kallion irronneen louhinnan yhteydessä teoreettisen louhinnan poikkileikkauksen ulkopuolelle enemmän kuin mitä toleranssi sallisi (louhinnan ylijäämä).

Kalliorakenne on kalliotilan kantavana rakenteena toimiva kallioseinä, -katto/-holvi tai -pilari.

Kalliorakennussuunnittelu tarkoittaa kalliorakenteiden suunnittelun lisäksi myös kohteen rakennussuunnittelua.

- **Kalliorakennussuunnittelija** on kalliorakennesuunnittelija, jonka tehtävään kuuluu myös rakennussuunnittelu eli kohteen toiminnallinen suunnittelu.

Kalliorakennesuunnittelu tarkoittaa kohteen kalliorakenteiden suunnittelua. Kalliorakennesuunnittelun tehtävään voi kuulua rakennussuunnittelun avustaminen tilojen sijoittelussa ja laajuuksien suunnittelussa.

- **Kalliorakennesuunnittelija** on suunnittelija, jonka tehtävä on kalliorakenteiden louhinta-, lujitus- ja tiivistyssuunnittelu. Tehtävässä vastataan kalliion rakenteellisen kestävyuden suunnittelusta.

Kalliorakentamistekninen suunnitelma on kalliorakenteiden suunnitelma.

Kallioräiske on äkillinen ja raju kallion pinnan särkyminen kivilajin joutuessa sen lujuuden ylittävän kuormituksen alaiseksi. Särkymisen yhteydessä kuuluu kovaaäänistä pauketta ja pinnasta irtoaa kivenkappaleita.

Kalliotila, kalliotunneli on maanalainen tila, jossa kallio muodostaa pääosan kantavasta rakenteesta. Kalliotunneli on tunneli, jonka pääasiallinen kantava rakenne on sitä ympäröivä kalliomassa.

Kantava rakenne on sellainen tunnelin kantavan pääjärjestelmän rakenne, joka vaikuttaa tunnelin kantokykyyn ja pysyvyyteen tai joka on liikennekuormien kuormittama. Kantaviin rakenneseisiin luetaan myös kallio ja maa siinä laajuudessa kuin ne vaikuttavat tunnelin kantokykyyn ja pysyvyyteen.

Katko on louhintatöissä kerralla louhittava osuus tunnelia tai kuilua.

Kiven heitto on räjäytyksessä irronneen kiven sinkoaminen.

Komu on kalliopinnassa oleva irtonainen kalliolohko. Komut rusnataan irti.

Kuilut ovat pystysuuntaisia tai lähes pystysuuntaisia tiloja, joihin sijoitetaan tunneli-tiloihin liittyviä ilmanvaihto- ja savunpoistoreittejä, tekniikkakuiluja ja/tai huolto-, poistumis- ja pelastusreittejä. Kuilut voivat olla rakenteeltaan kalliota, jolloin puhutaan kalliokuilusta.

Kuprikka on tunneliin louhittu syvennys/pieni potero/tunnelin laajennus.

Kuivatussuunnittelu on kalliopintojen muotoilun ja pinnan tasauksen määrittelyn sekä tarvittavien kuivatusrakenteiden (salaojitus) määrittelyn muodostamaa kokonaisratkaisua. Kalliotunnelin holvi- ja seinäpinnoille asennetaan ruiskubetonisalaojat, joiden tarkoitus on johtaa kalliopinnan vesivuodot hallitusti pohjan salaojakerroksiin.

Lakipiste on kalliotunnelin holvin korkein kohta.

Liittorakenne koostuu kahdesta tai useammasta rakenteesta muodostaen yhden kantavan rakenteen.

Louhe on kalliosta räjäyttämällä irrotettua ja lastaukseen sopivankokoista kiveä.

Louhinnan ennakkopalkki (louhintapalkki) on ennen louhintaa rakennettava teräsbetoninen tukipalkki, jonka tehtävänä on estää kallion ryöstyminen ja löyhtyminen kallioreunalla.

Louhinta on kalliomassaan tilan synnyttäminen esim. poraus-räjäytys -menetelmää käyttäen. Louhinta käsittää kaikki kallion irrottamiseen tarvittavat toiminnot.

Louhintasuunnittelu tarkoittaa louhittavien kalliopintojen mitoitus- ja laatumäärittelyä.

Lugeon-arvo kuvaa kallion vedenjohtokykyä.

Lujittaminen on kallion vahvistamista kalliopulteilla ja ruiskubetonirakenteella.

Lujituspultti / kalliopultti sitoo kalliomassan yhtenäiseksi estämällä yksittäisten kalliolohkojen liikkumisen ja irtoamisen kalliomassasta. Sen avulla voidaan myös ”siirtää” kuormia rakopintojen yli ehjään kalliomassaan.

Lujitussuunnittelu tarkoittaa kalliorakennetta vahvistavien kallion mekaanisten lujitusrakenteiden määrittelyä.

Lujitusrakenne on sellainen kantaviin rakenteisiin välittömästi liittyvä rakenneos, joka toimii osana kantavaa rakennetta sitä vahvistaen.

Lusta on siirrosrako, jossa on savea tai savimaista ainetta.

LVDT-menetelmä on LVDT-kennoon (Linear Voltage Differential Transformer) perustuva jännitystilamittausmenetelmä.

Nuolikorkeus on kalliotunnelin poikkileikkauksessa korkeusmitta holvikaarilinjan ja seinälinjan leikkauspisteestä tunnelipoikkileikkauksen lakipisteeseen.

Näin tehty -piirustus on rakennussuunnitelman asiakirja, johon on päivitetty rakentamisvaiheen toteutum tiedot ja mahdolliset suunnitelmamuutokset. Näin tehty -piirustus voi olla myös uusi rakentamisvaiheen toteutum tiedoa kuvaava asiakirja. Kohteesta riippuen näin tehty -piirustuksia on kutsuttu vaihtoehtoisesti myös tarke-, toteutuma- As built- tai loppupiirustuksiksi /-kuviksi.

Pelastustunneli on erillinen osastoitu tunneliputki, joka toimii sekä hyökkäystienä että uloskäytävänä.

Perä on vaakasuora tai lähes vaakasuora kulkuväylä/tunneli, jossa on peräseinä.

Pituuskalteva tunneli laskee ylemmältä suuaukolta alemmalle koko tunnelin pituudella.

Poistumistie on ratatunnelin reunassa oleva kävelykulkutie.

Poistumisreitti on ulos tunnelista johtava kulkureitti, joka voi muodostua poistumisteistä, yhdyskäytävistä, ajotunneleista, kuiluista, turvallisesta alueesta ja/tai tunneliasemasta.

Pysäköintitunneli on pysäköintilaitokseen johtava tunneli.

Pyöristyskaari on tunnelipoikkileikkauksen kainalossa olevan pyöristetyn kulman osuus.

Q-luokitus on kallion luokitusmenetelmä.

Rakennusgeologinen tulkinta on rakennusgeologinen kuvaus kohteen kallio-olosuhteista.

Rautatietunneli rautatieliikenteelle tarkoitettu tunneli. Rautatietunneli on radan ympärillä oleva rakenne, jonka avulla rautatie voi kulkea esimerkiksi kallion, rakennusten tai veden läpi. Rautatietunneli käsittää yhden tai useamman ratatunnelin, ratatunneleihin liittyvät muut tunnelit tai kuilut, tunneleiden suuaukkorakenteet, kuilujen yläpäiden rakenteet, tekniset ja turvallisuustilat sekä tiloihin ja tunneleihin asennetut laitteet ja tekniset järjestelmät. Rautatietunneliin kuuluvat myös ratatunneleiden avoleikkaukset siinä laajuudessa kuin kuivatus-, tie-, kunnossapito-, huolto- ja turvallisuusjärjestelyt edellyttävät.

RG -luokitus (rakennusgeologinen kallioluokitus) on kallion luokitusmenetelmä.

RMR -luokitus on kallion luokitusmenetelmä.

RQD -luku on kallion rakoluku (kpl/m).

Ruiskubetonointi on paineilmalla suuttimen läpi ruiskutettu betoni, joka on tehty perusseoksesta. Ruiskutettaessa ruiskubetonin oma liikemäärä saa aikaan tiiviin homogeenisen massan. Ruiskubetonointia käytetään kallio- ja maaperän vahvistuksessa. Yleisimpinä käyttökohteina on kalliotunnelien holvien ja seinien vahvistaminen (yhdessä kallioipulttien kanssa). Vallitsevana menetelmänä tunneleiden lujituksessa on märkäseosmenetelmä, mutta myös kuivaseosmenetelmää on käytetty. Ruiskubetonia käytetään myös yleisesti ei-kantavien ja kantavien betonirakenteiden korjaukseen ja vahvistamiseen.

Rusnaus on irtonaisten kivilohkareiden (komujen) irrotus louhitun tunnelin seinä- ja holvipinnoilta.

Sekaliikennetunneli on sekä henkilö- että tavaraliikenteen käytössä oleva ratatunneli.

Seurantamittaus on menetelmä, jolla todetaan/seurataan esimerkiksi kalliomassan siirtymiä tai pohjavedenpinnan korkeuden muutoksia

Sukeltava tunneli on tunneli, jonka molemmat suuaukot ovat tunnelin alinta osaa ylempänä.

Suuaukkorakenne on se kantava rakenne, jonka välityksellä tunneli liittyy ulkoilmaan.

Suuaukoille laskeva tunneli on tunneli, jonka molemmat suuaukot ovat tunnelin ylintä osaa alempana.

Taitorakenne

taitorakenteita ovat kaikki sellaiset rakenteet, joiden rakentamiseksi on laadittava lujuuslaskelmiin perustuvat suunnitelmat ja joiden rakenteellinen vaurioituminen suunnittelu- tai rakennusvirheen seurauksena saattaa aiheuttaa vaaraa ihmisille tai liikennejärjestelmälle ja merkittäviä korjauskustannuksia rakenteelle tai sen välittömälle ympäristölle. Tyypillisiä taitorakenteita ovat sillat (myös avattavat ja niiden koneistot ja järjestelmät), tunnelit, paalulaatat, meluseinät, kaukalorakenteet ja maanpaineen kuormittamat tukirakenteet kuten tukimuurit ja pysyvät tukiseinät. Vesiväylien taitorakenteita ovat kiinteät merimerkit, kanavien rakenteet, laiturit ja lauttapaikat, laiva- ja uittojohteet ja suuret kallioleikkaukset vesirajassa.

Tarkkuuslouhinta on tarkkuudeltaan sellaista louhintaa, jossa louhinnan tarkkuusvaatimus on pienempi kuin vallitseva yleislouhintatoleranssi.

Tietunneli on tie- tai katuverkolla oleva tunneli.

Tiivistysstrategia on suunnitelma toimenpiteistä, joilla kohteen tiivistystavoite tavoitetaan.

Tiivistäminen ks. injektointi.

Tiivistyssuunnittelu tarkoittaa kallion vuotovesien määrän pienentämiseen tähtäävien toimenpiteiden (esim. injektointi) suunnittelua.

Tuentarakenne on kalliotilojen tukirakenne, joina käytetään joissakin tapauksissa mm. teräskaaria yhdessä ruiskubetoniin kanssa, betonivalua, betonielementtejä ja valurautaelementtejä.

Tunnelin jänneväli on tunnelin/hallin leveys ts. molemmin puolin kantavina rakenteina toimivien kalliomassojen välinen etäisyys. Joskus jänneväli ei ole yksiselitteisesti määriteltävissä (risteysalueet). Risteysalueilla jännevälin voi määrittää piirtämällä risteysalueelle ympyrän ja jännevälinä käytetään tällöin ympyrän halkaisijaa.

Tunnelin pituus on sen alku- ja loppusuuaukkojen välinen etäisyys tunnelin keskilinjaa tai mittalinjaa pitkin laskettuna. Ks. myös **Kalliotunneli**.

Tunneliputki on rakenteellisesti yhtenäinen molemmista päistään maan pinnalle johdettava tila.

Työtunneli on tunneliyhteys varsinaiseen tie- tai ratatunneliin.

Verhousrakenne on kantavista rakenteista erillinen vedeneristys-, lämmöneristys-, kaasuneristys-, palosuoja- ja pinnoiterakenne tai niiden osa.

Yhdyskäytävä on kahden rinnakkaisen tunnelin välinen käytävä, johon voidaan sijoittaa ratatunnelia palvelevia järjestelmiä ja jota voidaan käyttää pelastus-, huolto- ja asennustehtävissä tai paineen- ja lämpötilavaihteluiden tasaukseen.

Yksiputkinen tunneli on yhdestä tunneliputkesta koostuva tunneli.

Yksisuuntainen liikenne: Ajoradalla yhteen suuntaan virtaava liikenne.

2.3.2 Lyhenteet

BeFo	Bergteknisk forskning
BY	Suomen Betoniyhdistys ry
EC	Eurokoodi (Eurocode)
EN	eurooppalaisessa standardoimisjärjestössä CENissä vahvistetun standardin tunnus
FISE	FISE Oy on rakennus-, LVI- ja kiinteistöalalla toimiva henkilö-pätevyyksiä toteava ja niiden kehittämiseen keskittyvä, voittoa tavoittelematon yritys, joka on neutraali toimija.
GSI	kallion laatua kuvaava lineaarinen suure
GTK	Geologian tutkimuskeskus
ISO	kansainvälisessä standardoimisjärjestössä ISOssa julkaistun standardin tunnus
ISRM	International Society for Rock Mechanics (kansainvälinen kallio-mekaniikkajärjestö)
KSK	kiskonselän korkeus, useimmiten metroradan ja raitiotien pystygeometrian sidontapiste
KV	korkeusviiva, jota käytetään rautatien pystygeometrian sidontapisteinä.
NGI	Norges Geotekniske Institutt
Q-luku	Q-luokitusjärjestelmän mukainen kallion laatuluokka
RBSO	ruiskubetonoinnin salaoja
RHK	Ratahallintokeskus
SFS	Suomessa vahvistetun standardin tunnus
SGY	Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry
TSV	tien tasausviiva, jota käytetään tien pystygeometrian sidontapisteinä.
YIV	Yleiset inframallivaatimukset
YVA	ympäristövaikutusten arviointimenettely, jota koskee laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä.
XA	Betonin ympäristörasitusluokka: kemiallinen rasitus
XC	Betonin ympäristörasitusluokka: karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
XD	Betonin ympäristörasitusluokka: kloridin aiheuttama korroosio (kloridit muualta kuin merivedestä)
XF	Betonin ympäristörasitusluokka: jäädytys-sulatusrasitus jään-sulatusaineilla tai ilman
XS	Betonin ympäristörasitusluokka: kloridien aiheuttama korroosio, kloridit merivedestä

2.4 Tunnelin suunnitteluvaiheet tie- ja ratahankkeissa

2.4.1 Yleistä

Tässä kappaleessa on käyty lyhyesti läpi suunnitteluvaiheet ja listattu eri suunnitteluvaiheiden tarkoitus ja tavoite ja listattu kunkin suunnitteluvaiheen lopuksi saatavat tulokset. Pohjana on käytetty tietunnelin suunnitteluvaiheita, mutta näitä voidaan soveltaa ratahankkeissa.

Suunnitteluvaiheet voivat kukin olla omia kokonaisuuksiaan, joihin tilaaja kytkee suunnittelijan suunnitteluvaihekohtaisilla sopimuksilla. Kallioteknisen suunnittelun ollessa vahvasti empiiristä suositellaan, että etenkin rakentamis- ja rakennusvaiheessa tilaaja hyödyntää saman suunnittelijan kerryttämää tietoa kyseisen kalliioympäristön ja -tunnelin erityispiirteistä.

Ratahankkeissa käytetään kohdan 2.4.2 suunnitteluvaiheesta termiä tarveselvitys. Suunnitteluvaiheet on esitetty tarkemmin seuraavissa kappaleissa (2.4.2 ...2.4.7), jotka on koottu näistä seuraavista lähteistä:

- Radan suunnitteluohje RHK B20:
https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rhk_b20_radan_suunnitteluohje.pdf
- Tiesuunnittelun kulku:
https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/34253/tiesuunnittelun+kulku_esite.pdf/1341b1b2-4629-4bdf-a763-32f41c7334e4

Taulukko 1. Tunnelin suunnitteluvaiheen tavoitteet ja tuloksia.

Suunnitteluvaihe	Tavoite/tarkoitus	Tuloksia
Esiselvitysvaihe	<p>Tutkitaan tiehankkeiden tarvetta ja ajoitusta maakunta-kaavan ja yleiskaavan likimääräisellä tarkkuustasolla.</p> <p>Laaditaan hankepäätöksen pohjaksi selvitykset (kehittämisseelvitys, tarveselvitys ja toimenpideselvitys), joissa perustellaan hankkeen tarpeellisuus, edellytyksiä ja mahdollisuuksia sekä arvioidaan eri ratkaisujen edullisuus.</p> <p>Voidaan päättää suunnittelun aloittamisesta.</p> <p>Asetetaan hankkeelle täsmälliset laajuutta, toimivuutta, laatua, kustannuksia, ajoitusta ja ylläpitoa koskevat tavoitteet.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - tavoitteet - vaihtoehdot - likimääräiset toimenpiteet - alustavat vaikutusarvioinnit - kustannusennusteet <p>Kallioteknisen suunnittelun tavoitteena on esittää arvio kallioresurssin käytettävyydestä.</p> <p>Tuloksena syntyy esitys ehdotuksesta yleissuunnittelun pohjaksi.</p>
	<p>Oikeuttaa tie-/ratasuunnitelman tutkimuksiin</p> <p>Ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA)</p> <p>Selvitetään lähtötiedot, suunnittelutehtävän laajuus ja vaativuus.</p> <p>Edellisten vaiheiden suunnitelma kehitetään toteutuskelpoiseksi yleissuunnitelmaksi.</p>	<p>Yleissuunnitelma, joka on nähtävillä.</p> <ul style="list-style-type: none"> - tien likimääräinen sijainti - liikenne- ja tietekniset perusratkaisut - tieympäristön maisemoinnin ja viheralueiden käsittelyn periaatteet - ympäristöhaittojen torjumisen periaatteet - vaikutusten arvioinnit - kustannusarvio - rakentamisen tavoitteellinen ajoitus ja rakentamisvaiheet <p>Tavoitteena on selvittää rakennuskohteen kalliopinnan sijainti ja kalliolaatu rakenteiden edullisinta sijoitusta varten, jotta voidaan valita toteuttamiskelpoisin kalliorakennusvaihtoehto. Tuloksena syntyy hyväksytty yleissuunnitelma ja pääpiirustukset.</p>
Yleissuunnitelma	Lunastusoikeus	<p>Tuloksena syntyy tarkat tiealueen suunnitelma-asiakirjat ja viranomaisten ohjeiden mukaisesti käsittelyyn jätetyt suunnitelma-asiakirjat.</p> <ul style="list-style-type: none"> - tarkka tiealue - yksityiskohtaiset ratkaisut - kustannusarvio ja mahdollinen kustannusten <p>Tavoitteena on selvittää rakentamisen kannalta oleelliset tiedot rakennettavasta kallioista.</p>
Tie-/ratasuunnitelma		
Rakennussuunnitelma-vaihe	Hankkeen toteuttaminen	<p>Tavoitteena on laatia mitoitettut kalliorakennussuunnitelmat kohteen rakentamista varten.</p> <p>Tuloksena syntyy hyväksytyt rakentamisessa tarvittavat asiakirjat. Rakentamisvaihe päättyy urakan vastaanottoon.</p>

2.4.2 Esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaihe

Esiselvitysvaiheessa tutkitaan tiehankkeiden tarvetta ja ajoitusta maakuntakaavan ja yleiskaavan likimääräisellä tarkkuustasolla. Esiselvityksiä on eri nimisiä ja sisällöltään erilaisia, sillä esiselvityksiä tarvitaan eri tarkoituksiin. Yleisimpiä hankekohtaisia esiselvityksiä ovat kehittämisselvitys, tarveselvitys ja toimenpideselvitys. Esiselvityksen perusteella voidaan päättää suunnittelun aloittamisesta. Tarpeellisiksi katsottavat toimenpiteet etenevät jatkosuunnitteluun ja toteutukseen rahoituksen sallimalla aikataululla.

Esiselvitysten tuloksia:

- tavoitteet
- vaihtoehdot
- likimääräiset toimenpiteet
- alustavat vaikutusarvioinnit
- kustannusennusteet

Jatkossa tästä suunnitteluvaiheesta käytetään nimitystä esiselvitysvaihe.

Esiselvitysvaiheessa kalliitekniikan suunnittelun tavoitteena on esittää arvio kallioresurssin käytettävyydestä.

2.4.3 Yleissuunnitelmavaihe

Yleissuunnittelu vastaa yleiskaavatasoista tai asemakaavatasoista maankäytön suunnittelua. Yleissuunnitelmassa määritellään tien likimääräinen paikka ja tilantarve sekä suhde ympäröivään maankäyttöön. Yleissuunnitteluvaiheen tarkoituksena on perustella, miksi hanke kannattaa toteuttaa ja tavoitteena saada hankkeelle mahdollisimman laaja yleinen hyväksyttävyyden.

Yleissuunnittelussa selvitetään tien likimääräinen sijainti, tien kytkennät nykyiseen sekä tulevaan tiestöön ja maankäyttöön, tekniset ja liikenteelliset perusratkaisut sekä ympäristöhaittojen torjumisen periaatteet. Suunnittelutarkkuus sovitetaan siten, että suunnitelman tekninen, taloudellinen ja ympäristöllinen toteuttamiskelpoisuus tulee varmistetuksi. Mikäli lainsäädäntö edellyttää ympäristövaikutusten arviointimenettelyä (YVA), tiehankkeen ympäristövaikutukset arvioidaan YVA-lain mukaisesti yleissuunnitteluvaiheessa.

Koska yleissuunnitelmassa määräytyvät tien sijainti ja laatu sekä tien vaikutukset ihmisten elinolosuhteisiin ja ympäristöön, on yleissuunnittelu tiehankkeeseen vaikuttamisen kannalta tärkein suunnitteluvaihe. Hyväksytty yleissuunnitelma voi rajoittaa muuta rakentamista ja synnyttää tienpitäjälle myös velvollisuuden lunastaa alueita. Yleissuunnitelmassa hyväksytyt periaatteellisia asioita ei tiesuunnitelmavaiheessa enää yleensä käsitellä. Tiesuunnitelman tullessa aikanaan käsittelyyn ei kyseisiin periaatteellisiin asioihin voi yleensä enää saada muutoksia muistuttamalla tai valittamalla.

Yleissuunnittelun tulos:

- väylän likimääräinen sijainti
- liikennetekniset sekä tie- ja ratatekniset perusratkaisut
- väyläympäristön maisemoinnin ja viheralueiden käsittelyn periaatteet
- ympäristöhaittojen torjumisen periaatteet
- vaikutusten arvioinnit
- kustannusarvio
- rakentamisen tavoitteellinen ajoitus ja rakentamisvaiheet

Yleissuunnitelmavaiheessa kallioteknisen suunnittelun tavoitteena on selvittää rakennuskohteen kalliopinnan sijainti ja kalliolaatu rakenteiden edullisinta sijoitusta varten, jotta voidaan valita toteuttamiskelpoisin kalliorakennusvaihtoehto. Yleissuunnitelmavaiheen suunnitelmaratkaisut toimivat lähtötietona tie- ja ratasuunnitteluvaiheelle.

Yleis- ja tiesuunnitelmat hyväksyy Liikennevirasto.

2.4.4 Tie- ja ratasuunnitelmavaihe

Tie- ja ratasuunnitteluvaiheessa suunnittelu on yksityiskohtaista suunnittelua ja vastaa asemakaavan tarkkuutta. Tässä suunnitteluvaiheessa määritetään tien tai radan tarkka sijainti, väylää varten tarvittavat alueet, maanteiden ja yksityisten teiden liittymät sekä muut tie- tai ratajärjestelyt, kevyen liikenteen ja joukkoliikenteen järjestelyt sekä muut yksityiskohtaiset ratkaisut, kuten liikenteen haittojen torjumiseksi tarvittavat toimenpiteet. Tie- ja ratasuunnitelmassa ratkaistaan maanomistajiin ja muihin asianosaisiin välittömästi vaikuttavat tekijät, joten vuorovaikutus painottuu heidän kanssaan sovittaviin asioihin.

Suunnitelmasta tehdään hyväksymispäätös, joka antaa tienpitäjälle oikeuden tietä/raata varten tarvittavan alueen haltuun ottamiseen. Hyväksyttyyn tie- tai ratasuunnitelmaan on joskus tarpeen tehdä muutossuunnitelma. Se käsitellään kuten alkuperäinen suunnitelma, ellei muutos ole vaikutuksiltaan niin vähäinen, että sopiminen kiinteistön omistajien kanssa riittää. Tien tai radan tekeminen voidaan aloittaa rahoituksen varmistuttua.

Tie- ja ratasuunnittelun tulos:

- tarkka väylän alue
- yksityiskohtaiset ratkaisut
- kustannusarvio ja mahdollinen kustannusten jako

Tie- ja ratasuunnitteluvaiheessa kallioteknisen suunnittelun tavoitteena on selvittää rakentamisen kannalta oleelliset tiedot rakennettavasta kalliosta. Tässä vaiheessa tarkennetaan edellisten suunnitteluvaiheiden suunnitelmaratkaisuja ja laaditaan yksityiskohtaisemmat kalliotekniset suunnitelmat. Tie- ja ratasuunnitelmavaiheen suunnitelmaratkaisut toimivat lähtötietoina rakennussuunnitelmavaiheelle.

2.4.5 Rakennussuunnitelmavaihe

Rakennussuunnitelmavaihe liittyy hankkeen toteuttamiseen ja kattaa rakentamisessa tarvittavien asiakirjojen laatimisen. Usein rakennussuunnitelman laatimisesta vastaa urakoitsija. Vuorovaikutus rakentamisesta vastaavien ja maanomistajien sekä muiden asianosaisten kanssa jatkuu koko suunnittelun ja rakentamisen ajan tiesuunnitelman asettamissa rajoissa. Pienehköissä tiehankkeissa tie- ja rakennussuunnitteluvaiheet

voidaan yhdistää. Ratahankkeissa rakennussuunnitelmavaiheessa tuotetaan toteuttamisen edellyttämät suunnitteluasiakirjat.

Rakennussuunnittelun tulos:

- rakentamisessa tarvittavat asiakirjat
 - o selostusasiakirjat
 - o suunnitelma-asiakirjat
 - o tekniset suunnitelmakansiot ja suunnitteluaineisto

Rakennussuunnitteluvaiheessa laaditaan kohteen mitoitettut kalliorakennussuunnitelmat kohteen rakentamista varten. Tässä vaiheessa laaditaan tarkemmat kalliorakenteiden mitoituslaskelmat, kalliotekniset suunnitelmapiirustukset, työselostukset ja suunnitellaan seuranta- ja tarkkailumittaukset.

2.4.6 Rakentamisvaihe

Rakentamisvaiheessa tarkistetaan ja päivitetään rakentamisaikaiset suunnitelmat, tehdään asiantuntijavalvontaa, laaditaan toteutumapiirustukset ja arkistoidaan suunnitelma-asiakirjat.

Rakentamisvaiheen tulos:

- päivitettyt rakentamissuunnitelmat
- arkistointi

Rakentamisvaiheessa kallioteknisessä suunnittelussa varmistetaan ennustettu kallio-laatu ja seurataan kallion liikkeitä sekä tehdään kalliorakennesuunnitelmiin tarvittavat muutokset.

2.4.7 Käyttöönottovaihe- ja kunnossapito

Rautatietunneleille on laadittava huoltokirja ennen käyttöönottoa. Huoltokirjan sisältämissä kunnossapitosuunnitelmassa on varmistettava, että tunnelille asetetut vaatimukset täyttyvät koko järjestelmän käyttöiän. Huoltokirjassa tulisi huomioida myös kalliotekniset seikat. Tietunneleille ei ole vastaavaa huoltokirjaa edellytetty, mutta sellaisen laatiminen on suositeltavaa.

Käyttöönottovaiheessa ja kunnossapidon aikana kallioteknisessä suunnittelussa seurataan rakentamisen pitkäaikaisvaikutuksia ja suoritetaan seurantamittausohjelmien mukaiset kalliotutkimukset.

3 Kalliotutkimukset ja kalliotutkimusten sekä seurantamittausten suunnittelu

3.1 Yleistä

Kalliotutkimukset ovat osa kalliorakennesuunnittelua, sillä ne kertovat rakennusmateriaalin, yleensä kantavana rakenteena toimivan kallion ominaisuuksista. Suositeltavinta on, että kalliorakennesuunnittelusta vastaava taho suunnittelee kalliotutkimusohjelmat. Jokaisessa suunnitteluvaiheessa kalliorakennesuunnittelija seuraa kalliotutkimusten edistymistä, arvioi niiden tuloksia ja tarvittaessa täydentää tutkimusohjelmaa sekä laatii ja vastaa kallio-olosuhteista tehdyistä tulkinnoista.

Kalliotutkimusten tavoitteena on muodostaa suunnitteluvaiheen tarkkuutta varten riittävä käsitys kalliooperän sijainnista ja rakennettavuudesta sekä ympäristöolosuhteista. Tässä luvussa on kuvattu kalliotunnelin kallioteknisen suunnittelun edellyttämien kalliotutkimusten suunnittelu. Yleisimmin kalliotunnelin kallioteknisessä suunnittelussa tarvittavat tiedot on kuvattu alla olevassa taulukossa (Taulukko 2).

Kalliorakennuskohteen kalliotekniset lähtötiedot perustuvat pääasiassa kalliooperätutkimuksiin, joihin kuuluu myös olemassa olevan tutkimustiedon hankinta. Olemassa olevan tutkimustiedon hankintaan kuuluu tärkeänä osana olemassa olevien maanalaisien tilojen tai kalliotunneleiden kalliolaadun kartoitustietojen hankinta tai tilojen kartoitus sekä läheisyydessä sijaitsevien tilojen *as built* -materiaalien hankinta.

Alla on listattu tärkeimpiä tutkimusmenetelmiä mitoitusparametrien määrittämiseksi suoritusjärjestyksessä (Valtanen 2002):

1. Olemassa olevien tutkimustietojen hankinta
2. Geologinen kartoitus
3. Maatutka ja seisminen refraktioluotaus (seismiset luotaukset)
4. Porakonekairaus ja muut kalliopinnan korkeusasemaa tutkivat menetelmät (esim. keilaukset, vaaitukset)
5. Kallionäytekairaus ja kallionäyttereikien kuvaus + vesimenekikokeet
6. Kalliooperän jännitystilamittaus
7. Laboratoriokokeet kivilajien ja rakojen lujuus- ja muodonmuutosominaisien selvittämiseksi
8. Pohjavesitutkimukset

Tietojen määrä ja luotettavuuden vaatimus kasvavat suunnitteluvaiheiden edetessä.

Taulukko 2. Yleisimmät kalliotunnelin kallioteknisen suunnittelun edellyttämät tutkimuksilla selvittävät lähtötiedot.

Kallioperän sijainti	Kallion rakennettavuus	Ympäristöolosuhteet
Paikkaan sidottu kalliopinnan korkeusasema	Kallion laatu Kivilaatu (kivilaji) Rapautuneisuus	Pohjaveden korkeusasema (pintataso, paine)
Paikkaan sidottu maakerrosten paksuus	Rakoilun geometria ja mekaaniset ominaisuudet Kiven mekaaniset ominaisuudet Kalliomassan vedenjohtavuus Kallioperän heikkou-svyöhykkeet Kallioperän rakennettavuus	Pohjaveden laatu (aggressiivisuus) mm. lujitusrakenteiden rasitusluokkien määrittelyä varten

3.2 Tutkimusten suunnittelua koskevat määräykset ja ohjeet

3.2.1 Kansallinen lainsäädäntö

- Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista (465/2014)
 - o 6 § ”Rakennushankkeeseen ryhtyvän on selvittettävä rakennuspaikan pohjaolosuhteet rakennushankkeen suunnittelun yhteydessä rakennuspaikalla tehtävällä pohjatutkimuksella.”
 - o 6 § ” Jos on odotettavissa, että rakentaminen voi aiheuttaa haitallisia muutoksia ympäristön luonnonolosuhteissa, maa- ja kalliopohjassa, pohjaveden virtauksessa, pohjavedessä tai rakennusalueen tai ympäristön rakennuksissa tai rakenteissa, on rakennushankkeeseen ryhtyvän selvittettävä muutosten vaikutukset. Haitallisten vaikutusten välttämiseksi on rakentamisen sekä tarvittaessa rakennuksen käytön aikana seurattava vaikutuksia rakennushankkeeseen ryhtyvän laatiman tarkkailuohjelman mukaisesti ja rakennettava tarvittaessa tarkkailumittausjärjestelmä.”
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140465>
- Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus (10.1.2018)
 - o 2.6 ”Rakennushankkeeseen ryhtyvän on selvittettävä rakennuspaikan pohjaolosuhteet rakennushankkeen suunnittelun yhteydessä rakennuspaikalla tehtävällä pohjatutkimuksella.”
 - o 2.6 ” Jos on odotettavissa, että rakentaminen voi aiheuttaa haitallisia muutoksia ympäristön luonnonolosuhteissa, maa- ja kalliopohjassa, pohjaveden virtauksessa, pohjavedessä tai rakennusalueen tai ympäristön rakennuksissa tai rakenteissa, on rakennushankkeeseen ryhtyvän selvittettävä muutosten vaikutukset. Haitallisten vaikutusten välttämiseksi on rakentamisen sekä tarvittaessa rakennuksen käytön aikana seurattava vaikutuksia rakennushankkeeseen ryhtyvän laatiman tarkkailuohjelman mukaisesti ja rakennettava tarvittaessa tarkkailumittausjärjestelmä.”
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B687245F6-C824-413F-BB52-7A9DF0EDC210%7D/137126>

3.2.2 Liikenneviraston ohjeet

- Liikennevirasto 10/2015, Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, suunnitteluvaiheen ohjaus.
 - o Ohjeessa määritetään tie-, rata- ja vesitiehankkeiden maa- ja pohjarakenteiden suunnittelussa ja rakentamisessa lähtötietoina tarvittavat geo- ja kalliotekniset tutkimukset ja mittaukset sekä niiden sisältö ja määrä suunnitteluvaiheittain.
 - o Ohje toimii Eurokoodi 1997:n osan 2 soveltamisohjeena, mutta ohje ei sisällä vaatimuksia kalliotunneleiden erityistutkimuksille.
 - o Ohjeessa esitetään vaatimukset tutkimusten laadunhallinnasta, noudatettavista standardeista sekä vaatimukset pohjatutkimusten suorittajille.
 - o Geotekniset tutkimukset ja mittaukset -ohje kattaa kaikkien väylämuotojen geotekniset ja kalliotekniset tutkimukset.
 - o Ohjeen kappaleessa 8.2 on käsitelty Infra-pohjatutkimusformaattia ja tietomallia
- Liikennevirasto 18/2017, Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot, Mittausohje
 - o Ohjeessa on kuvattu tie- ja ratahankkeiden suunnittelussa tarvittavat maastomittaukset, mittausten tekemisen yleiset ja yksityiskohtaiset ohjeet, laatuvaatimukset ja dokumentointi sekä laaduntarkastusmenettelyt.
- Liikenneviraston ohje 19/2017, Maastotietojen hankinta – Toimintaohje.
 - o Ohje asettaa tie- ja ratahankkeiden suunnitelmia laativien konsulttien toimintajärjestelmälle vähimmäisvaatimukset, joita konsultit täsmentävät omissa toiminta-/laatu järjestelmissään ja hankekohtaisissa projektisuunnitelmissa.
 - o Toimintaohje jakaantuu kahteen pääosaan: geodeettisiin mittauksiin ja maaperätietoihin.
 - o Toimintaohjeessa on kuvattu mitä maastotietoja hankitaan eri suunnitteluvaiheissa (esisuunnittelu, yleissuunnittelu, tie-/ratasuunnittelu ja rakennussuunnittelu). Toimintaohje jakaantuu kunkin tuotteen kohdalla seuraaviin osiin: yleistä, tehtävät, laadunvarmistus, tulokset ja dokumentointi.
- Liikennevirasto ohje 12/2017: Tie- ja ratahankkeiden inframalliohje
 - o Ohjeessa on kuvattu, miten käsitellään lähtötietoja digitaaliseen muotoon jäsenneltyinä.

3.2.3 Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit

- SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus
 - o standardi on tarkoitettu käytettäväksi yhdessä standardin SFS-EN 1997-1 kanssa se täydentää sitä mm. pohjatutkimuksien suunnittelun ja niistä raportoinnin sekä koetulosten tulokinnan ja arvioinnin osalta.
- SFS-EN ISO 22475-1 Geotekninen tutkimus ja koestus. Näytteenottomenetelmät ja pohjavesimittaukset. Osa 1: Työn suorituksen tekniset periaatteet
 - o Standardi on osa eurokoodijärjestelmää ja määrittelee esimerkiksi kallionäytekairaukselta vaadittavia toiminnallisen laadun asioita, esimerkiksi kairausluokat

3.2.4 Alan yleiset tekniset ohjeet

- ISRM: The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring 2007-2014
 - o Kansainvälisen kalliomekaniikkajärjestön kirja ohjeistaa kiven ja kallion laboratoriokokeiden suunnittelua ja toteutusta
 - o Ohje tulisi huomioida yhdessä SFS-EN 1997-2:n kanssa
- Suomen Geoteknillisen yhdistyksen (SGY) kairausoppaat
 - o SGY:n kairausoppaat määrittävät eri kairaustyyppien tekotapaa, mutta eivät ota kantaa kairausten suunnitteluun
 - o osa kairausoppaista on korvattavissa standardeilla, esim. SFS-EN ISO 22476-1, 2 ja -10.
 - o Kairausoppaat ovat ladattavissa SGY:n julkaisusivuilta:
<https://sgy.fi/toiminta/julkaisut/>
- Pohjatutkimusmerkinnät SGY 201/2005
 - o suunnitelmissa käytettävät pohjatutkimusten merkintätavat
<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/pohjatutkimusmerkinnat-2005.pdf>
- Geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin olennaiset käsitteet ja periaatteet
 - o julkaisu on osittain käsitteitä ja periaatteita selventävä ohjeistus
 - o julkaisu antaa lähinnä vinkkimuotoisesti ohjeita monitorointiohjelman suunnitteluun
https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/geoteknisen_mittaamisen_ja_monitoroinnin_olennaiset_kasitteet_ja_periaatteet_6-11-2017_julkaisu.pdf
- Infra-pohjatutkimusformaatti SGY ohje 204
 - o julkaisun tarkoituksena on yhtenäistä menettelyä infrastruktuurin suunnitteluvaiheen tiedonsiirroissa eri ohjelmistojen, tietokantojen ja alan toimijoiden välillä.
http://www.citygeomodel.fi/Infra_formaatti_v2.3_211215.pdf
- Rakennusalan kallioluokitus (Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, geoteknillinen laboratorio, tiedonanto 12, 1974)
 - o opas määrittelee rakennusgeologisessa kartoituksessa käytettävän RG-luokituksen periaatteet
- Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen (Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 25, 1976)
 - o opas määrittelee rakennusgeologisessa kartoituksessa käytettävän RG-luokituksen käytännön soveltamisen periaatteet
- ISO-kallioluokituksen soveltaminen Suomessa
 - o SFS-EN ISO 14689-1. 2007. Geotekninen tutkimus ja koestus. Kallion tunnistaminen ja luokitus. Osa 1: tunnistaminen ja kuvaus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., Helsinki.

- Yleiset inframallivaatimukset: <https://buildingsmart.fi/infrabim/yiv/>
 - o YIV:n osassa 3 (Lähtötiedot) on esitetty infrahankkeita varten muodostettavan lähtötietomallin sisältö sekä sisällölle ja mallin muodostusprosessille asetettavat vaatimukset.
 - o Maaperämallissa maakerrosrajapinnat tulkitaan topografian ja pohjatutkimustuloksien perusteella erillisinä pintoina, esimerkiksi kallion pinta tai saven alapinta. Maakerrosrajapinnat muodostuvat kuten maastomallitkin pisteistä ja viivoista sekä niistä muodostetusta kolmiopinnasta. Kalliopinnan osalta on erotettava avokalliopisteet ja -viivat, varmistetun kallionpinnan pisteet ja tulkitut pisteet ja viivat. Muiden maaperämallin pintojen osalta pohjatutkimuksen kohdalla tehty tulkinnat tulee erotella muista lisätulkinnoista.
 - o Esimerkki: kalliopinnan tulkintapisteet erotellaan eri koodeilla: avokallio, porakonekairauksella varmistettu kallio ja muussa kairauspisteessä tehty tulkinta
 - o kallioteknistä suunnittelua koskeva osuus on päivittymässä vuoden 2018 aikana.

3.2.5 Kaupunkien ja kuntien ohjeet

Kalliotutkimusten osalta ei tunnistettu erillistä ohjeistusta.

3.2.6 Pohjoismainen ohjeistus

Pohjoismaissa kalliotutkimusten ohjelmoinnin ohjeistus:

Norja:

- Statens Vegvesen: Håndbok N500 Vegtunneler
 - o Norjan tielaitoksen ohje, joka määrittelee tietunnelin laatuvaatimukset.
 - o Norjan tielaitoksen tietunneleita koskevan ohjeen liitteessä 2 on esitetty vaatimukset eri suunnitteluvaiheissa tehtävistä geologisista tutkimuksista
https://www.vegvesen.no/_attachment/61913
- Statens Vegvesen: Håndbok V520 Tunnelveiledning,
 - o täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla
 - o Geologiset tutkimukset kuvailtu luvussa 2
https://www.vegvesen.no/_attachment/1597247/binary/1144089

Ruotsi:

- Trafikverket: TDOK 2016:0231 Krav Tunnelbyggande
 - o määrittelee tunnelin laatuvaatimukset Ruotsin liikenneviraston tie- ja rautatiehankkeissa.
<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=cc943b78-c6d5-4d3f-ba48-a82e45af805d>
- BeFo: Geohydrologiska förundersökningar i berg
 - selvitys hydrogeologisista tutkimusmenetelmistä
- Formas: Hydrogeologi för bergbyggare
 - oppikirjamainen, hydrogeologiaa kalliorakentamisen näkökulmasta

3.3 Kalliotutkimukset eri hankevaiheissa

Kunkin eri suunnitteluvaiheen tutkimustulokset tulisi saada käyttöön jo ko. suunnitteluvaiheen alussa. Seuraavan suunnitteluvaiheen aloittamisen mahdollistava tutkimusohjelma olisi hyvä tehdä aina edellisen vaiheen loppupuolella, jotta tilaaja voi toteuttaa tutkimukset suunnitteluvaiheiden välillä ja jotta tutkimustieto vastaa aina uudessa suunnitteluvaiheessa todellisia tarpeita.

Tässä kappaleessa käydään läpi suunnitteluvaiheet tutkimustiedon näkökulmasta sekä keskitytään siihen mitä kussakin suunnitteluvaiheessa tutkitaan, miten ja mitä asioita selvitetään. Kappaleessa 3.8 on esitetty ohjeellisia tutkimusmääriä.

Taulukko 3. Suunnitteluvaiheet ja suunnitteluvaiheen tavoite kalliotutkimusten näkökulmasta.

Suunnitteluvaihe	Tavoite tutkimusten näkökulmasta
Esiselvitysvaihe (hankekohtaisesti esim. kehittämis- selvitys, tarveselvitys, toimenpideselvitys)	Arvio kallioresurssin käytettävyydestä, yleispiirteinen käsitys kalliooperän sijainnista, rakennettavuudesta ja ympäristöolosuhteista.
Yleissuunnitelmavaihe	Selvitetään rakennuskohteen kalliopinnan sijainti ja kalliolaatu rakenteiden edullisinta sijoitusta varten. Arvio pohjavedenhallinnan ratkaisusta.
Tie-/ratasuunnitelma- vaihe	Kohteen kalliopinnan sijainnin tarkistus ja kalliolaadun yksityiskohtainen selvitys ensisijaisesti rikkonaisten kallio-osuuksien ja/tai vaativien rakenteiden kallio- teknistä suunnittelua ja mitoitusta varten. Lisäksi selvitetään rakentamisen kannalta oleelliset tiedot rakennettavasta kallioista sekä saadaan sopimuksen tekoa helpottavia tietoja rakennuttajaa ja urakoitsijaa varten.
Rakennussuunnitelma- vaihe	Yksityiskohtaiset tiedot kalliooperän korkeusasemasta, kallion laadusta, maaperästä, pohjavesiolosuhteista.
Rakentamisvaihe	Kalliolaadun tarkistus ja seurantamittaukset

3.3.1 Esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaiheen kalliotutkimukset

Suunnitteluvaiheen kallioteknisen suunnittelun tavoitteiden täyttämisen edellytys on muodostaa tutkimustietojen perusteella yleispiirteinen käsitys kalliooperän sijainnista, rakennettavuudesta ja ympäristöolosuhteista esimerkiksi alueiden keskinäistä vertailua varten ja päätöksenteon tueksi. Hankkeen alkuvaiheessa kalliorakennesuunnittelijan työ onkin usein luonteeltaan muuta suunnittelua avustavaa asiantuntijatyötä.

Kalliorakennushankkeen alkuvaiheen selvityksissä kallio-olosuhteista ei useimmiten ole vielä tarkkoja tietoja. Alkuvaiheen selvityksissä voidaan hyödyntää esim. kaupunkien tai GTK:n suurimittakaavaisia aineistoja. Hankkeen tyypistä riippuen on tehtävä arvio uusien tutkimuksien toteuttamisen tarpeesta suhteessa tavoitteisiin. Melko usein esisuunnitelmavaiheessa ei tarvita erillisiä tutkimuksia, vaan riittävä tarkkuus saadaan olemassa olevan suurimittakaavaisen aineiston avulla. Alustavilla tutkimuksilla voidaan selvittää, onko alue rakennuskelpoinen sekä kartoitetaan rakentamisen riskit ja

rajoitukset. Erityisen tärkeää on selvittää, mahdollistaako kalliokaton riittävyys rakentamisen edellytykset. Erityisesti on tarkastettava tunnelin otsat ja kalliopainanteiden kohdat. Tässä vaiheessa tutkimuksilla haetaan tietoa maakerrosten paksuuksista, kalliopinnan korkeusasemasta, kivilajeista, kalliolaadusta, alueen pohjavesiolosuhteista ja rakennetusta ympäristöstä. Tulosten perusteella arvioidaan vaihtoehtoisten rakennusalueiden kallioperän rakennettavuus, tarpeeseen parhaiten sopivat kallioresurssit ja jatkotutkimustarve. Suunnitteluvaiheen lopuksi ehdotetaan jatkotutkimuksia seuraavan suunnitteluvaiheen sujuvaa käynnistämistä varten.

3.3.2 Yleissuunnitelmavaiheen kalliotutkimukset

Yleissuunnitelmavaiheessa esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaiheen tietoja täydennetään yleissuunnitelmavaiheessa tehtävien mitoituskaskentojen vaatimusten mukaisiksi sekä selvitetään rakennuskohteen kalliopinnan sijainti ja kalliolaatu rakenteiden edullisinta sijoitusta varten. Yleissuunnitelmavaiheessa kalliotutkimuksilla halutaan saada tietoa alueen geologiasta, kallioperän topografiasta, kallion laadusta, maakerrosten paksuuksista ja pohjavesiolosuhteista. Tarkennettavia tekijöitä ovat alueen heikkousvyöhykkeet, rakosuunnat ja niiden mekaaniset ominaisuudet, ehjän kiven mekaaniset ominaisuudet, jännitystila, vedenjohtavuus sekä ympäristön rakenteet ja laitteet. Tuloksia käytetään kalliolaadun, tilakoon ja -muodon, lujitus- ja tiivistystarpeen määrittämiseen. Yleissuunnitelmavaiheen lopuksi ohjelmoidaan kalliotutkimukset seuraavaa suunnitteluvaiheen tarpeita varten.

Yleissuunnitelmavaiheessa tulisi varmistaa, että kalliokaton paksuus on joka puolella riittävä, erityisesti risteysalueilla ja halleissa sekä kallio-otsilla. Yleissuunnitelma- vaiheessa suunnittelutyössä kiinnitetään rakennettavuuden varmistamiseen ja kustannusarvion luotettavuuteen.

3.3.3 Tie- ja ratasuunnitelmavaiheen kalliotutkimukset

Tie- ja ratasuunnitelmavaiheessa kalliotutkimuksilla selvitetään rakentamisen kannalta oleelliset tiedot rakennettavasta kallioista sekä saadaan sopimuksen tekoa helpottavia tietoja rakennuttajaa ja urakoitsijaa varten. Tutkimuksissa on tärkeää tarkistaa kohteen kalliopinnan sijainti sekä selvittää kalliolaatu yksityiskohtaisemmin. Lisäksi tulee selvittää, esiintyykö alueella tiloja leikkaavia rako- tai heikkousvyöhykkeitä. Heikkousvyöhykkeiden sijainnin selvitys on oleellista, sillä heikkousvyöhykkeet vaikuttavat louhinnan kestoon ja siten suoraan kalliotunnelin rakentamiskustannuksiin. Tie- ja ratasuunnitelmavaiheen lopuksi ohjelmoidaan kalliotutkimukset rakennussuunnittelun tarpeisiin.

Kallio-olosuhteet poikkeavat toisistaan huomattavasti jopa samalla rakennusalueella. Tutkimuksissa selvitettäviä tekijöitä ovat: alueen heikkousvyöhykkeet, rakosuunnat ja niiden mekaaniset ominaisuudet, ehjän kiven mekaaniset ominaisuudet, jännitystila, vedenjohtavuus sekä ympäristön rakenteet ja laitteet. Kivinäytteiden laboratoriotutkimuksia ja jännitystilamittauksia suoritetaan, jotta saadaan lähtöarvot kalliomekaanisille mallinnusohjelmille.

3.3.4 Rakennussuunnitteluvaiheen kalliotutkimukset

Tässä suunnitteluvaiheessa alueen kallioperästä muodostetaan kolmiulotteinen kuva, jota käytetään tilojen lopullisen muodon ja lujituksen suunnitteluun. Kohteen suunnittelu edellyttää edellisiin suunnitteluvaiheisiin verrattuna vielä yksityiskohtaisempia tietoja kallioperän korkeusasemasta, kallion laadusta ja heikkousvyöhykkeistä, maaperästä, pohjavesiolosuhteista, rakennetusta ympäristöstä ja kaavoituksesta.

Rakennussuunnitteluvaiheessa tehdään edellisiä suunnitteluvaiheita tarkempia rakennuskohteen kalliomekaanisia mitoituslaskentoja, jotta saadaan laadittua kohteen kalliorakennesuunnitelmat rakentamisen vaadittavalla tarkkuudella. Edellisten suunnitteluvaiheiden kalliotutkimustietoja on täydennettävä tarkempien ja yksityiskohtaisempien mitoituslaskentojen vaatimusten mukaisiksi.

Rakennussuunnitteluvaiheessa tehtäviin asiakirjoihin kuuluu usein myös kalliomekaaninen seurantaohjelma sekä pohjavedenhallintasuunnitelma. Tässä suunnitteluvaiheessa selvitetään myös alueen rakennusten painumisriski.

3.3.5 Rakentamisvaiheen kalliotutkimukset

Rakentamisvaiheen kalliotutkimuksien tarkoituksena on varmistaa kallio-olosuhteet lopullisten louhinta-, lujitus- ja tiivistyssuunnitelmien sekä mahdollisten tuentarakenteiden suunnittelua varten.

Rakennusvaiheessa tarkkaillaan myös alueen pohjavesiolosuhteita, ks. kohta 3.7 . Vaativissa ja/tai laajoissa kalliorakennushankkeissa on seurattava lisäksi kallion liikkeitä, ks. kohta 3.6 .

Kalliomekaanisten seurantojen tarkoitus on varmistua tehtyjen kalliomekaanisten mitoituslaskelmien oikeellisuudesta mittauspisteiden kohdalla, josta voidaan usein tehdä oletus laskelmien oikeellisuudesta, myös muualla kuin mittapisteiden kohdalla. Tällä varmistetaan suunnitelmien toteutettavuus ja tilojen käyttöajan turvallisuus.

3.3.6 Käytön ja kunnossapidon aikaiset kalliotutkimukset/-seurannat

Kalliorakennuksen käytön ja kunnossapidon aikana tehtävillä kalliotutkimuksilla/mittauksilla seurataan rakentamisen pitkäaikaisvaikutuksia sekä rakentamisesta kallioon ja ympäristöön aiheutuneita muutoksia. Saatujen tulosten perusteella saadaan arvokasta tietoa myöhempien kalliorakennushankkeiden suunnittelua varten. Kunnossapidon aikana tarkkaillaan kalliorakenteiden toimivuutta ja seurataan kallion liikkeitä ja pohjaveden pinnankorkeuksia, ks. kohdat 3.6 ja 3.7 .

3.4 Kalliotutkimusmenetelmät

3.4.1 Aiemmin laaditun materiaalin kerääminen

Kalliotutkimusten suunnittelu alkaa aiemmin laaditun suunnittelu- ja tutkimusaineiston keräämisellä. Tähän kuuluu mm. karttamateriaalien kerääminen alueelta, maastomallin hankkiminen, alueella jo olevien kalliotilojen tutkimus- ja kartoitustietojen kerääminen sekä alueella olevien rakennusten ja rakenteiden selvittäminen. Aluksi kerättävän materiaalin laajuudesta ja laadusta riippuen sitä voidaan hyödyntää joko vain hankkeen alussa tai siihen voidaan palata suunnittelun edetessä.

Erilaisia lähtöaineistoja voidaan hyödyntää eri tavoin. Jos suunnittelualueelle on rakennettu tai suunniteltu rakentamista, alueelta on jo mahdollisesti tehty pohjatutkimuksia, joita voi katsoa esimerkiksi kaupunkien omista palveluista (esim. <http://soili.hel.fi/> ja <http://kartta.hel.fi/>) tai GTK:n ylläpitämästä pohjatutkimusrekisteristä (<http://www.gtk.fi/tietopalvelut/palvelukuvaukset/pohjatutkimus.html>). Myös olemassa olevien rakenteiden omistajilla voi olla tiedossa tutkimusaineistoa. Nämä tiedot tulee selvittää ja hankkia tulokset kalliotunnelin suunnittelijoiden käyttöön. Vaikka alueelta ei olisikaan tehty varsinaisia pohjatutkimuksia, voidaan maa- ja kalliopinnan topografiasta sekä jossain määrin myös maa- ja kallioperän ominaisuuksista saada tietoa myös erilaisista karttapalveluista (mm. <https://paikkatietoikkuna.fi/>, <http://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html> sekä <https://hakku.gtk.fi/>). Rakennetuilla alueilla voi olla käytettävissä aiempien louhintojen kartoitustietoja, tai jos näitä ei ole tehty, niin kalliotiloja ja avoleikkauksia voidaan kartoittaa niiltä osin, joita ei ole ruiskubetonoitu tai muuten peitetty. Myös erilaisten rakennusmonttujen tietoja voidaan hyödyntää. Samoin mm. maalämpökaivojen sijainnit ja muut tiedot tulee saada suunnittelijoille tai hankkeessa voidaan erikseen sopia, että suunnittelija kerää tiedot.

Edellä kuvatut tiedot ovat yleensä melko pienellä vaivalla selvitetty ja suurelta osalta ilmaisia tai edullisia hankkia. Haasteena on, että tietoja tulee hankkia useista erilaisista lähteistä ja niiden taso sekä tarkkuus vaihtelevat paljon.

3.4.2 Paljastumakartoitus, maastokäynti, rakennusgeologinen kartoitus

Suunnittelualueeseen tulee tutustua heti suunnittelun alkuvaiheessa. Yleensä ensimmäisissä suunnitteluvaiheissa suoritetaan yleispiirteinen maastokartoitus, jossa saadaan yleiskuva alueesta, sen topografiasta ja mahdollisten kalliopaljastuminen, avoleikkausten ja kalliotilojen osalta jo alustava kuva kallioperästä. Samalla myös arvioidaan lähtöaineiston paikkansapitävyyttä. Suunnittelun edetessä alueeseen tutustutaan tarkemmin ja viimeistään tie- tai ratasuunnitteluvaiheessa suoritetaan yksityiskohtaiset geologiset kartoitukset. Rakennusgeologinen kallioluokitus käsitellään tarkemmin kohdassa 4.3.4.

Kalliolaatua arvioitaessa tulee ottaa huomioon, että havainnot kuvaavat kalliota vain paikallisesti, eikä voida olettaa samanlaisen kalliolaadun jatkuvan kauemmas yksittäisestä havaintopisteestä. Geologi arvioi kalliolaatua laajasti kaiken olemassa olevan tiedon perusteella, ei vain yksittäisen havainnon perusteella.

3.4.3 Seismiset luotaukset

Seismisiä tutkimuksia suoritettaessa maankamaraan aikaansaadaan kimmoaaltoja. Aallot heijastuvat ja taittuvat ominaisuuksiltaan erilaisten kerrosten rajapinnoilta. Mit-talaitteelle palaavat aallot rekisteröidään ja kulkuaikojen perusteella voidaan tulkita maa- ja kallioperän rakenteita.

Seismisiä luotauksia käytetään kalliopinnan sekä kallioperän heikkousvyöhykkeiden sijainnin selvittämiseen, myös kivilajeista ja niiden rajapinnoista voidaan saada tietoa. Seismiset tutkimukset soveltuvat parhaiten kohteisiin, joissa tarvitaan laaja-alaisesti alustavaa tietoa kalliopinnasta ja kallion heikkousvyöhykkeistä. Seismisten linjojen kohdille suositellaan lisäksi kairapisteitä, joista saadaan tulkintaan tukipisteitä. Seis-misillä tutkimuksilla voidaan havaita kallion heikkousvyöhykkeitä, koska seismisen aallon nopeus on suurempi ehjässä kalliossa kuin rikkonaisessa tai rapautuneessa kal-liossa.

Maalaji, lajite, kivilaji	Seisminen nopeus pohjavedenpinnan yläpuolella			Seisminen nopeus pohjavedenpinnan alapuolella		
	1	2	3	1	2	3
humuspitoinen pintamaa	200-500		300-500			
savi	200-700 (1 500)	600	300-600 (1.200)	1 200-1 800	1 275-1 600	1 100-1 600
hiesu			500-800 (1 200)			1 200-1 500
hieta	200-800	350-850 400-950	300-500	1 200-1 800	1 350-1 850 1 325-2 100	900-1 500
hiekkä						
sora	400-1 300		400-1 200	1 200-1 800		1 200-2 000
löyhä hieta-, hiekkamoreeni	200-1 300	450-1 300	300-500	1 200-1 800	1 650-2 100	1 200-1 500
tavallinen hiekkamoreeni	700-1 500		400-1 200	1 300-2 000		1 200-1 600
tiivis hiekkamoreeni	1 500-2 200 (2 700)		1 600-2 800	2 00-2 500 (2 700)		1 600-2 800
rapakallio	500-1 500			2 700-4 000	2 600-3 800 (4 000)	3 000-4 000
graniitti, gneissi				4 500-5 700	4 100-5 300	4 500-5 900
kiilleluiske				4 100		
amfiboliitti, gabro				6 000	5 000-5 700	5 500-6 000

Kuva 4. Maa- ja kivilajien seismisiä vp-nopeusarvoja (m/s) pohjavedenpinnan ylä- ja alapuolella. Sarakkeiden 1 ja 2 arvot ovat suomalaisista, sarakkeen 3 arvot ruotsalaisista lähteistä (Peltoniemi 1988).

Seismisiä tutkimuksia suoritetaan yleensä käyttäen räjähteitä. Räjähteiden käytössä on rajoituksia taajama-alueella ja sähkölinjojen läheisyydessä.

3.4.4 Maatutkaluotaus

Maatutkaluotauksessa maankamaraan lähetetään radioaaltoja ja rekisteröidään takaisin heijastuvat aallot. Radioaallot taittuvat ja heijastuvat sähköisiltä ominaisuuksiltaan erilaisista rajapinnoista. Maakerrosten sähköisiin ominaisuuksiin vaikuttaa voimakkaasti vesipitoisuus kerroksissa.

Maatutkaluotaus soveltuu paremmin maakerroksen tutkimiseen, esimerkiksi johtojen ja putkien havaitsemiseen kuin kallioperän tutkimiseen. Kalliopinta voidaan havaita, mutta tulkinnan tueksi tarvitaan muita tukitietoja, esimerkiksi porakonekairauksia.

Maatutkan syvyysulottuvuus riippuu voimakkaasti mitattavan materiaalin sähkönjohtavuudesta. Hyvin johtavissa maalajeissa, kuten märissä savissa, syvyysulottuvuus voi jäädä erittäin matalaksi.

3.4.5 Painovoimamittaukset

Painovoimamittaukset perustuvat tiheyseroihin maakerroksen ja kallioperän välillä. Painovoimamittauksilla voidaan selvittää kalliopinnan topografiaa pääpiirteissään. Painovoimamittaukset soveltuvat usein tehtäviksi myös rakennetussa ympäristössä. Painovoimamittaukset ovat hinnaltaan edullisempia ja nopeampia kuin seismiset mittaukset, mutta painovoimamittauksen tulos on seismistä epätarkempi. Painovoimamittaukset ovat luonteeltaan suhteellisia, joten tulkinnan tueksi tarvitaan jokaiselle mittalinjalle absoluuttista kallioperän korkeustietoa (esimerkiksi porakonekairauksia tai avokalliopaljastumia). Painovoimamittausten tulee alkaa ja päättyä korkeusasemaltaan tunnetulta pisteeltä.

3.4.6 Pohjavesitutkimukset

Pohjaveden pinnan lisäksi voidaan selvittää pohjaveden laatua. Pohjaveden laatu vaikuttaa mm. lujitusrakenteiden kestävyYTEEN, joten se täytyy ottaa huomioon rakentamisessa. Pohjaveden pinnankorkeus ja kausivaihtelut tulee tuntea ennen kuin rakentaminen alkaa siihen vaikuttaa.

3.4.7 Maavastusluotaus

Maavastusluotaus perustuu maa- ja kivilajien sähkönjohtavuuseroihin. Menetelmällä voidaan selvittää alustavasti kalliopinnan korkeusasemaa, maakerroksia sekä pohjaveden pintaa. Menetelmällä voidaan myös saada tietoa kallioperän kivilajien rajapinnoista sekä heikkousvyöhykkeistä.

Tulkinnan tueksi tarvitaan porakonekairauksia. Voimakkaat sähkölähteet häiritsevät mittauksia luoden virhelähteitä tulosten tulokinnalle.

3.4.8 Porakonekairaus

Porakonekairauksella saadaan yleensä luotettava pistekohtainen havainto kalliopinasta. Kalliopinta varmistetaan tyypillisesti vähintään kolmen metrin kalliovarmistuksella. Porakonekairauksia voidaan myös jatkaa syvemmälle kallioon. Tällaisen syvän porakonekairausreiän porauksessa seurataan tunkeutumisnopeutta ja porasoijan laatua, mutta siitä ei saada kallionäytettä. Porakonekairausreiässä voidaan suorittaa mm. vesimenekkikokeita, kuvantamista tai kalliopohjaveden näytteenottoa. Syvät porakonekairausreiät tulee aina täyttää, kun tarvittavat tutkimukset on suoritettu. Avoimeksi jätetty reikä aiheuttaa merkittävän riskin, jos alueella suoritetaan myöhemmin louhintoja. Tavanomaiset kolmen metrin kalliovarmistukset tulee täyttää tapauskohtaisesti. Kairareikä täytetään stabiililla sementtisuspensiolla standardin SFS-EN ISO 22475-1 mukaisesti. Reikä täytetään standardin mukaisesti letkulla pohjalta alkaen, sillä sementtisuspension kaataminen reiän suulta ei ole kaikissa tapauksissa varmistanut reiän täyttymistä riittävästi.

Myös porakonekairauksen tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti, koska joissain tapauksissa on esimerkiksi tiivis pohjamaahan tulkittu virheellisesti kalliopinnaksi.

3.4.9 Kallionäytekairaus

Kallionäytekairauksella saadaan kalliosta kairasydännäyte. Kallionäytekairauksella tehdään yleisimmin $\varnothing=76$ mm terällä (näytteen halkaisija n. 51 mm) tai $\varnothing=56$ mm terällä (näytteen halkaisija n. 41 mm). Kairasydännäytteestä saadaan tietoa kalliooperästä. Kallionäytekairaus on ainoa menetelmä, jolla saadaan lähes häiriintymätön näyte varsinaisesta suunnittelukohteesta. Kallionäytteen häiriintyminen määritellään näytteenotto-luokkina A, B ja C standardin SFS-EN ISO 22475-1 kohdan 7.2 määrittelyn mukaisesti. Näytteenottoluokka määrittelee käytettävän kairauskaluston. Liikenneviraston kohteissa kairauksen suunnitellaan näytteenottoluokan C perusteella, ellei toisin ole tarpeen määrittää. Liikenneviraston kohteissa kallionäytekairaukset tulee aina suunnitella logattavaksi huolimatta siitä, käytetäänkö reiän kuvantamista vai ei.

Kallionäytekairauksella saadaan varma havainto kalliopinnan korkeustasosta sekä tietoja mm. rakojen jatkuvuudesta ja pituudesta. Kallionäytteestä määritetään loggaamalla kivilaatu, rapautuneisuus, osasten järjestäytyneisyys, raekoko, mineraalit ja kivilaji sekä rakoilutyyppi eli rakotiheys ja rakojen laatu mukaan lukien rakotäytteet ja niiden paksuudet sekä haarniskaraot. Kallionäytteestä kirjataan ylös myös katkosumma, rakokulmat asteina ja näytehukat. Lisäksi määritetään kalliolaatu RG-luokituksen mukaan sekä määritellään Q-lukuparametreista RQD-luku, rakosuuntien lukumäärätekijä J_n , rakopinnan karkeusluku J_r ja rakopinnan muuttuneisuusluku J_a . Kairanäytettä loggaavan geologin tulee myös kirjata ylös heikkousvyöhykkeet ja muut havaitsemansa erityispiirteet näytteestä sekä kuvailla näytettä sanallisesti. Kallionäyte valokuvataan ja säilytetään mahdollisia myöhempiä tutkimuksia varten.

Kallionäytekairausreiässä voidaan suorittaa mm. vesimenekikokeita, kuvantamista tai kalliopohjaveden näytteenottoa.

Kallionäytekairausreiät tulee aina täyttää kallio-osuudelta, kun on varmistettu, että kaikki halutut tutkimukset reiässä on suoritettu. Avoimeksi jätetty reikä aiheuttaa merkittävän riskin, jos alueella joskus tulevaisuudessa suoritetaan louhintoja tai muuta kalliorakentamista. Kairareikä täytetään stabiililla sementtisuspensiolla standardin SFS-EN ISO 22475-1 mukaisesti. Reikä täytetään standardin mukaisesti letkulla pohjalta alkaen, sillä sementtisuspension kaataminen reiän suulta ei ole kaikissa tapauksissa varmistanut reiän täyttymistä riittävästi.

Kallionäytekairauksen toteuttamiskustannukset ovat korkeahkot, mutta tutkimuksesta saatava tieto on tärkeää suunniteltaessa kalliotilaa ja arvioitaessa sen kustannuksia.

3.4.10 Muut pohjatutkimusmenetelmät

Lisätietoa suunnitteluun voidaan saada myös muista kairauksista ja tutkimuksista, joita ovat esimerkiksi koekuopat, paino-, heijari-, puristin- (CPT), täry- sekä puristin-heijarikairaukset. Väylähankkeissa nämä tutkimusmenetelmät soveltuvat lähinnä suuaukkojen ja mahdollisten pysty-yhteyksien kohdalle selvittämään maakerrosten laatua ja koekuoppien osalta kertomaan kalliopinnan tarkan sijainnin.

3.4.11 Vaaitus, maa- ja kalliopinnan laserkeilaus

Maa- ja kalliopinta voidaan vaaita tai laserkeilata, jolloin saadaan selville pinnan tarkka korkeusasema. Kalliopinnasta saadaan tieto vain kalliopaljastumista, avoleikkauksista ja kalliotiloista. Maa- ja kalliopinta voidaan myös 3D-valokuvata, mutta toistaiseksi nyky menetelmillä aineiston sitominen koordinaatistoon on haasteellista ja useimmiten lopputulos ei ole yhtä luotettava kuin laserkeilattu aineisto.

3.4.12 Vesimenekkikokeet

Kallionäytekairaus- sekä joskus myös porakonekairausrei'issä voidaan suorittaa vesimenekkimittauksia. Mittaus kertoo vedenjohtokyvystä niissä raoissa tai rakenteissa, jotka tutkimusrei'kä mittausvälillä lävistää. Useiden mittauksen perusteella voidaan arvioida tutkittavan alueen vedenjohtavuutta laajemmin.

Vesimenekkikokeet tehdään kairarei'issä yleensä noin kuuden metrin välein. Kokeet tehdään joko yksi- tai kaksitulppamenetelmällä. Mittausvälille pumpataan vettä kahdella tai kolmella ylipainesarjalla ennalta määritetyn ajan. Paine määräytyy ylipaineena luonnolliseen pohjaveden paineeseen nähden. Mittauksessa kirjataan ylös kullakin paineella kallioon mennyt vesimäärä. Käytetyn paineen, ajan, vesimäärän ja mittausvälin pituuden perusteella voidaan laskea ns. Lugeon-arvo, joka kuvaa kallion vedenjohtokykyä. Lugeon-arvon laskeminen on esitetty tarkemmin kohdassa 5.5.3 .

Tutkimusrei'issä on käytetty tyypillisesti esimerkiksi ylipainesarjaa 0,3 MPa – 0,6 MPa – 0,3 MPa mittausajalla 10 min / koe. Mittausajan pidentäminen kasvattaa mittaus tulokset tarkkuutta ja lyhentäminen tyypillisesti heikentää. Sopivia mittauksen ylipaineita on esitelty esimerkiksi teoksessa Houlsby (1990). Useamman mittauksen sarjan tarkoituksena on varmistaa oikein tulkittu tulos, jotta esimerkiksi tyhjien rakojen täyttymisen tai rakojen avautumisen vaikutus saadaan tulkittua lopulliseen tulokseen. Tulkintaa on parhaiten yksinkertaisimmin kuvattu teoksessa By53/2006 Kalliotilojen Injektointi, mutta seikkaperäisemmin teoksissa Houlsby (1976 ja 1990).

Vesimenekkikokeita tehdään myös rakentamisen aikana injektointiprosessiin kuuluvissa tunnistelu-, injektointi- ja kontrollirei'issä. Nämä kokeet tehdään tyypillisesti 1-tulppamenetelmällä koko reikäpituudelle ja yhdellä ylipaineella 5 minuutin mittauksella.

Maakerrokseen tehdyn vesimenekkikokeen tulosten perusteella voidaan tehdä helposti yleistyksiä maakerroksen ominaisuuksista. Kallion osalta tilanne on toinen, sillä skandinaavisessa kovassa kivessä varsinaisen kiven vedenjohtavuus on käytännössä nolla (0) ja mitattu tulos kertoo reikää lävistävien hydraulisesti vettä johtavien rakojen vedenjohtokyvystä, joka on riippuvainen yksittäisen raon avaumasta ja rakojen määrästä mittavälillä. Lisäksi esimerkiksi ruhjerakenteessa, joka koostuu savitäytteisistä raoista, voi vedenjohtavuus olla ensimmäisillä mittauksilla hyvinkin lähellä nollaa (0) johtuen saven tiiveydestä. Näin ollen yleistyksen kalliolaadun ja vedenjohtavuuden välillä ovat useimmiten harhaanjohtavia.

Kallioperän vesimenekkikokeiden suorittamiseen ja tulkintaan on olemassa standardi SFS-EN ISO 22282-3, joka soveltuu osittain tunnelirakentamisen kokeiden suorittamiseen, mutta ei kaikilta osin.

3.4.13 Tutkimusreiän optinen ja akustinen kuvantaminen

Kallionäytekairaus- ja porakonekairausreikiä voidaan kuvata joko optisella tai akustisella kuvantamisella. Akustinen menetelmä on keskimäärin parempi löytämään raot kuin optinen menetelmä, mutta akustisessa kuvauksesta ei käytännössä pysty tunnistamaan kivilajeja. Akustinen kuvaus toimii vain vesitäytteisissä rei'issä. Veden ei tarvitse olla kirkasta, vaan kuvaus onnistuu myös sameassa vedessä tai esimerkiksi muoviputken läpi. Optisen kuvantamisen tuloksena saadaan visuaalinen tulkinta kairareistä, tunnistetaan kivilajit ja saadaan tietoa rakoilusta, mutta reiän tulee olla puhdas eikä siellä oleva vesi saa olla sameaa.

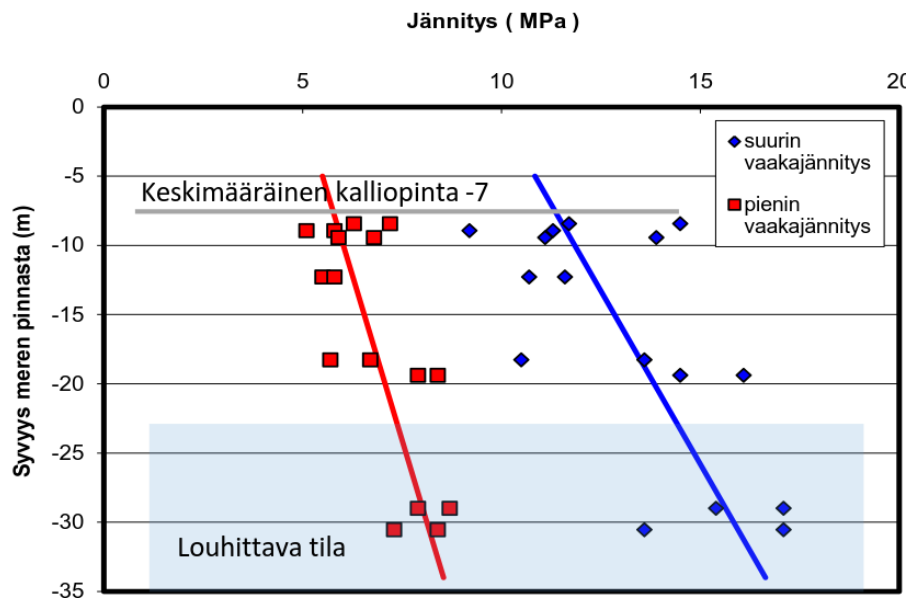
Tutkimusreiän kuvantamisella saadaan siis selville rakosuunnat, rakojen avonaisuus ja täytteisyys, heikkousvyöhykkeiden sijainti ja kivilajit. Kuvantamisella on mahdollista saada tietoa myös niiltä alueilta, joissa esiintyy näytehukkaa. Samoin kuvantamisella saadaan rakosuunnat niiltäkin osuuksilta, joissa näytteen suuntaaminen on epäonnistunut. Näin ollen kuvantaminen täydentää hyvin kallionäytekairauksesta saatavaa tietoa. Aina kuvantaminen ei onnistu reiän sortumisen tai sortumisvaaran takia.

3.4.14 Jännitystilamittaukset

Kalliota louhittaessa vaikutetaan kalliossa vaikuttavaan jännityskenttään, joka louhinnan ja kallioon louhitun tilan vaikutuksesta sekä purkautuu että keskittyy. Jännitystilan suuruus ja suunta selvitetään jännitystilamittauksin. Kun kalliossa vallitseva jännitystila tunnetaan, voidaan louhinnan vaikutukset simuloida ja ennakoida. Tyypillisesti yksi pääjännityksistä on pystysuora ja perustuu pintakohteissa kalliomassan painosta. Muut kaksi pääjännitystä ovat yleensä vaakajännityksiä. Vaakajännitys on tyypillisesti ja joskus huomattavastikin suurempi kuin pystyjännitys johtuen mannerlaattojen toisiinsa kohdistavista voimista. Uutta mannerlaattaa syntyy Atlantin keskiselänteellä, joten luode – kaakkosuuntaa (315°), joka on suunnilleen kohtisuoraan Atlantin keskiselännettä kohti, on Suomen kalliooperässä todennäköisin suurimman jännitystilan suunta.

Suomessa toteutetuissa kalliorakennuskohteissa jännitystilamittauksia on perinteisesti tehty hyvin vähän ja hyvin myöhäisessä suunnitteluvaiheessa, sillä mittaustuloksia ei ole laajasti osattu riittävästi hyödyntää suunnittelussa, vaan suunnittelu on perustunut konservatiivisiin lähtöoletuksiin sekä taulukkomitoituksiin tai korkeisiin konaisvarmuuskertoimiin. Jos jännitystila määritetään aikaisessa suunnitteluvaiheessa, voidaan sitä hyödyntää kohteen suunnittelussa paremmin. Jännitystila tulee määrittää sitä tarkemmin, mitä rakennetummassa ympäristössä ollaan, mitä haasteellisempi rakenneratkaisu on ja mitä suuremmaksi vaurioriski arvioidaan. Mittausten määrään vaikuttaa louhintojen laaja-alaisuus sekä se, kuinka voimakkaasti heikkousvyöhykkeet ovat jakaneet kalliomassan osiin. Kun kohteen kalliomekaaninen mitoitus tehdään käyttäen numeerisia menetelmiä (ks. kohta 4.4.3), tulee myös kallion jännitystilasta olla käytöstä luotettavat lähtötiedot.

Jännitystila mitataan yleisimmin olemassa olevasta kalliotilasta, mutta osa menetelmistä soveltuu myös maan pinnalta tutkimusrei'istä tehtäviksi. Lähellä pintaa (<30 m syvyydessä) on tärkeää selvittää vaakajännityksen suuruus ja suunta, syvemmällä olevissa kohteissa korostuu myös pystyjännityksen merkitys. Normaalisti jännitystila kasvaa syvemmälle mentäessä.



Kuva 5. Esimerkki syvyyden ja jännitystilän suuruuden vaikutuksesta Liikenneviraston kohteessa.

Jännitystilaa mitataan joko irtikairausmenetelmällä tai hydrauliseen murtamiseen perustuvalla menetelmällä. Irtikairaukseen perustuvat jännitystilamittaukset soveltuvat melko lähellä kalliopintaa sijaitseviin kohteisiin, jännitystilan kannalta tällaisiksi pintakohteiksi luetaan alle sadan metrin syvyydessä olevat kohteet. Hydrauliset mittausmenetelmät soveltuvat ensisijaisesti syvälle kallioon tehtäviin kohteisiin, joissa kallio on varsin ehjää. Kallion pintaosissa tai rakoilleessa kalliossa tehdyissä hydraulisiin menetelmiin perustuvien mittausten tuloksissa on yleensä erittäin suurta hajontaa ja tulkinta on epäluotettava.

Irtikairausmenetelmät mittaavat suoraan joko vaaka- tai kaikkien kolmen pääjännityskomponenttien suuruudet ja suunnat. Esimerkkejä irtikairauskennoista ja tekniikoista ovat LVDT, CSIRO-HI, Borre, USBM, Doorstopper. Näistä menetelmistä LVDT mittaa suurinta kalliovolyyymiä, kun taas muut ovat pistemäisiä kairareikämittauksia. LVDT-mittaus tehdään olemassaolevista kalliotiloista käsin. Kaikissa irtikairausmittauksissa on ensisijaisen tärkeää mittaajan ammattitaito, mittaustyön laadunvarmistus, geologisen ympäristön huomioiva tulkinta sekä tulkin luotettavuuden ja virhemarginaalien arviointi. Valittu menetelmä ja kalliolaatu vaikuttavat mittausten määrään: pääsääntöisesti kairareikämittauksia tulee tehdä yhdessä pisteessä niin monta, että tulokselle saadaan toistettavuutta (vähintään kaksi toisiaan tukevaa tulosta). Suuremman hajonnan vuoksi niitä tulisi tehdä myös useammassa pisteessä. Yksi LVDT -vaakajännitysmittaus sisältää kaksi ja 3D-mittaus neljä tai viisi isohalkaisijaista irtikairauksista lyhyissä rei'issä, jolloin myös tuloksen hajonta on yleensä pienempi. Mitä rakoilleempi tai ruhjeisempi kallio on, sitä suurempi on yleensä myös mittaustulosten hajonta. Osa hajonnasta on tällöin todellista, mutta rikkonaisuus lisää myös tulkintavirheitä (Hakala 2018).

Vuonna 2017 kerättiin kaikki Suomessa tehdyt jännitystilamittaukset Aalto Yliopistossa julkaistuksi diplomityöksi "Update of Finnish in situ Rock Stress Data":

<https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/29427>

3.4.15 Laboratoriokokeet kivelle ja laboratoriokokeet mekaanisten ominaisuuksien testaamiseksi

Kivinäytteiden laboratoriotutkimukset ovat osa kalliomekaanisia tutkimuksia. Laboratoriokokeilla saadaan selville kiven kimmo-ominaisuudet sekä puristus- ja vetolujuus. Rakopintoja testataan rakojen kitka- ja koheesio-ominaisuuksien selvittämiseksi. Rakopintojen ominaisuudet voidaan arvioida myös kalliolaatuluokitusparametrien perusteella.

Eurokoodi 7:ssa (SFS-EN 1997-2) on esitetty maan ja kallion laboratoriokokeet (mm. kalliomateriaalin lujuuskokeet). Laboratoriotutkimuksia varten on ISRM laatinut eri tutkimustavoille ja määrittämisille suositukset, jotka koskevat laitteita, näytteiden kokoa ja käsittelyä. Laboratoriossa voidaan tutkia näytteestä: mineraalikoostumus, muuttuneisuusaste ja raekoko, rapautuneisuus, huokoisuus sekä iskun- ja kulutuksenkestävyys. Laboratoriotutkimusten tuloksia hyödynnettäessä on huomioitava, että ne edustavat vain kyseessä olevan näytteen ominaisuuksia eivätkä koko kalliomassaa. Tutkimuksissa täytyy ottaa huomioon, että testattavien näytteiden määrä ja edustavuus ovat riittäviä. Rakoleikkauskokeiden haasteena on usein ehjän näytteen saaminen esim. rikkonaisesta kalliosta.

3.4.16 Pohjaveden kemiallinen räsitus

Pohjavesitutkimuksia on käsitelty kohdassa 3.5.5. Kalliopohjaveden kemialliset kokeet tulee tehdä, jotta betonirakenteiden (esim. ruiskubetoni, kallion lujituspultin juotoslaasti) käyttöikämäärittelyn edellyttämät ympäristön räsitusluokat (SFS-EN 206, XA-räsitusluokat) voidaan määrittää. Käytännössä tämä tarkoittaa, että on tutkittava näytteistä pH, aggressiivisen hiilidioksidin pitoisuus (CO_2), sulfaattipitoisuus (SO_4^{2-}), ammoniumpitoisuus (NH_4^+) ja magnesiumpitoisuus Mg^{2+} . Suositeltavaa on tutkia myös pohjaveden arseenipitoisuus, lämpötila, väri, suolapitoisuus, sameusaste ja vedenjohtavuus.

3.4.17 Kalliomekaaniset seurantaohjelmat ja pohjaveden seuranta

Kalliomekaanisen seurantaohjelman mukaisilla mittauksilla todennetaan kalliorakenteen käyttäytyminen louhinnan aikana, joka on ennalta arvioitu mitoituslaskelmien perusteella. Suunnitteluvaiheessa on määritettävä eri seurantaohjelmien laadinnan yhteydessä myös ennusteet kallion käyttäytymisestä ja on määritettävä hälytysarvot, joihin mittaustuloksia verrataan. Seurantatulosten ja aikaisemmin päätettyjen hälytysrajojen perusteella päätetään louhinta- ja lujitussuunnitelmiin mahdollisesti tarvittavista muutoksista. Louhintatyön aikana kalliolaatua seurataan louhinnan etenemisen myötä Q-luokituksen ja rakennegeologisen kallioluokituksen mukaisesti, ks. kohta 6.

Kalliomekaanisen seurantaohjelman laadintaa on käsitelty kohdassa 3.6 ja pohjaveden hallintasuunnitelmaa kohdassa 3.7. Vuotovesien hallintaa ja tiivistyssuunnittelua on käsitelty kohdassa 5.

3.4.18 Rakosavien (savimineraalit) laboratoriokokeet

Savimineraaleissa tapahtuu kahdenlaista paisumista. Paisuvahilaisiksi saviksi kutsutaan paisuva savimineraaleja, joilla paisuminen tapahtuu kiteiden sisäisten kerrosten välissä eikä se palaudu. Yksittäisiä savisia rakoja, jotka eivät sisällä paisuvahilaisia savia, esiintyy yleisesti pystyrakoja sisältävässä kallioperässä. Paisuvahilaisia savia ovat

mm. smektiitti (montmorilloniitti ja saponiitti) ja vermikuliitti. Savimineraalin sisältäessä paisuvahilaisia komponentteja se saattaa absorboida vettä ja aiheuttaa kalliorakoon kohdistuvan paisuntapaineen.

Epäiltäessä kalliorakojen täytteenä olevien savien sisältävän paisuvahilaisia savia ylipäänsä ja niiden määrän ollessa merkittävä, kannattaa ne testata. Saville voidaan tehdä mineraalimääritys XRD-menetelmällä. Suoraviivaisempi ja kustannustehokkain tapa erityisesti rakennustyön aikaisissa testauksissa on mitata saven vapaa paisuminen, jonka jälkeen (mikäli savi todetaan aktiiviseksi) sille voidaan tehdä paisuntapainekoe (paisuntavoima). Liikenneviraston kohteista erityisesti Tampereen Rantatunnelissa suositettiin tätä menetelmää (ks. kohta 9.1.1).

Taulukko 4. Saven aktiviteetin luokitus vapaan paisunnan kokeen perusteella (NTH 1978).

Tilavuuden muutos (%)	Saven aktiviteetti
< 80	ei-aktiivinen savi
80...120	vähän aktiivinen savi
> 120	aktiivinen savi

Taulukko 5. Saven aktiviteetin luokitus paisuntapaineen perusteella (Broms ja Heiner 1979).

Paisuntapaine (kPa)	Saven aktiviteetti
< 100	ei-aktiivinen savi
100...200	matala-aktiivinen savi
200...500	normaali-aktiivinen savi
> 500	korkea-aktiivinen savi

3.4.19 Kalliotutkimusmenetelmät suunnitteluvaiheittain

Alla olevaan yhteenvetotaulukkoon on kerätty keskeisimmät kalliotutkimusmenetelmät suunnitteluvaiheittain.

Taulukko 6. Keskeisimpiä kalliotutkimusmenetelmiä suunnitteluvaiheittain (muokattu lähteestä Valtanen 2002).

Tutkimustapa/-menetelmä	Suunnitteluvaihe				
	Esisuunnitelma- / tarveselvitysvaihe	Yleissuunnitelma-vaihe	Tie- ja rata-suunnitelma-vaihe	Toteutussuunnittelu (rakennus-suunnitelmavaihe)	Käyttö- ja kunnossapitovaihe
Olemassa olevien suunnitelma-, tarke- ja tutkimustietojen hankinta	•	•	•	•	
Paljastumakartoitus	•	•	•		
Rakennusgeologinen kartoitus	(•)	(•)	•	•	•
Maatutka		•	•		
Seisminen luotaus		•	•		
Porakonekairaus		•	•	•	
Kallionäyttekairaus		•	•	•	
Jännitystilamittaus		•	•	•	
Laboratoriokokeet			•	•	
Kalliomekaaniset seurantamittaukset				•	•
Pohjavesitutkimukset		•	•	•	•

3.5 Kalliotutkimusohjelmien laadinta

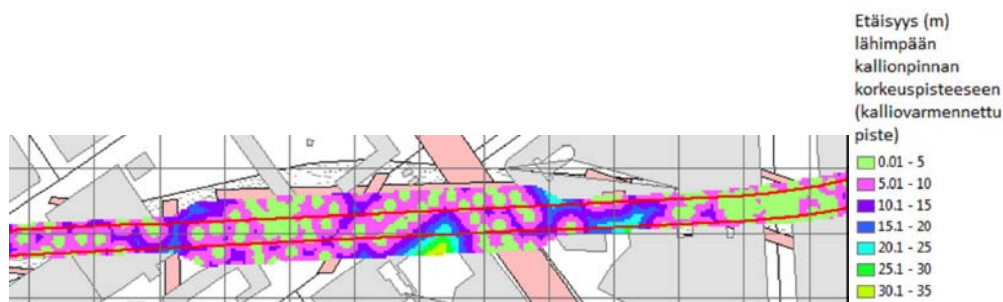
3.5.1 Kalliotutkimusten suunnittelu, yleistä

Kalliotutkimukset suunnittelussa noudatetaan eurokoodia SFS-EN 1997-2 sekä Liikenneviraston ohjetta 10/2015 *Geotekniset tutkimukset ja mittaukset*. Tässä selvitystyössä kerrotaan kalliotunnelin kalliotutkimusten osalta täydentävät ohjeet ja käytännöt em. ohjeisiin.

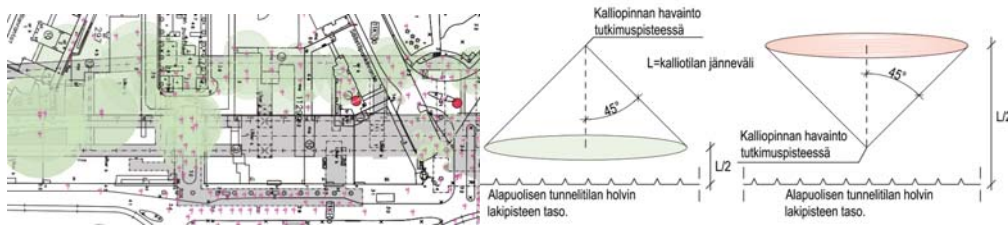
Tutkimusten ohjelmointi on syytä tehdä huolella, sillä tutkimusten toteutuskustannukset ovat etenkin hankkeen elinkaaren alkuvaiheessa korkeahkot suhteessa muihin suunnitteluvaiheen kustannuksiin ja ne vievät jonkin verran aikaa. Suunnitteluvaiheen tavoitteen määrittämä tarkkuustaso, suunnittelukohteen laaja-alaisuus sekä käytettävissä olevat resurssit asettavat merkittävästi reunaehdoja tutkimusten suunnitteluun etenkin hankkeen ensimmäisten suunnitteluvaiheiden aikana. Kalliopinnan selvittämiseen kalliotunneleiden osalta on olemassa nyrkkisääntö, jonka mukaan ns. normaaleissa olosuhteissa kalliopinta on tunnettava samalla pistevälillä, joka on suunniteltavien tilojen päälle jäävän kalliokaton otaksuttu paksuus. Tätä nyrkkisääntöä sovelletaan rakentamisvaihetta edeltäviin suunnitteluvaiheisiin asteittain.

Tulkinnan perusteella tuotetusta kalliopintamallista on aina syytä tehdä jonkin tasoinen luotettavuusanalyysi. Geoteknisen suunnittelun näkökulmasta on Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä -sarjassa laadittu julkaisu: 27/2015, *Kallionpintamallin luotettavuuden analysointi porakonekairausten määrän ja laadun perusteella*. Laajempaa maantieteellistä aluetta lävistäviä kalliotunneleita varten tehtävän kalliopintamallin luotettavuusanalyysiin ei ole yhtä ja oikeaa tapaa, mutta visuaalisia esityksiä on tehty Liikenneviraston kohteissa esimerkiksi seuraavin menetelmin:

- **Louhittavasta tilasta riippumaton analyysi (Kuva 6)**
 1. tutkimusalueen kaikkiin kohtiin lasketaan etäisyys lähimpään tutkimuspisteeseen ja määritetään etäisyysriippuva väri
 2. värien avulla voidaan visuaalisesti hahmottaa alueet, joilla mittauksien epävarmuus on suuri: mitä suurempi etäisyys lähimpään tutkimuspisteeseen, sitä suurempi epävarmuus
- **Louhittavasta tilasta riippuva kartioanalyysi (Kuva 7)**
 1. Kalliohavainnosta muodostetaan kartio sovitulla kulmalla (esim. 45°) kohti alapuolisen tunnelin holvin tasoa tai holvitason yläpuolelle sovittua tasoa.
 2. Tasolle muodostuvan kartion pohjan pinta-ala kertoo kalliokattopaksuudesta.



Kuva 6. Louhittavasta tilasta riippumaton luotettavuusanalyysi, Pisararadan ratasuunnitelmavaiheen työaineisto.



Kuva 7. Louhittavasta tilasta riippuva luotettavuusanalyysi, projisointitasona käytettiin tilan jännevälän (L) puolikasta holvi tason yläpuolella, Pesararadan alustavan rakennussuunnitelman piirustus.

3.5.2 Kalliotutkimusohjelman rakenne

Kalliotutkimusohjelma koostuu tekstimuotoisesta selostusosasta ja tarvittaessa selvästä kartta-aineistoista ja piirustuksista. Kalliotutkimusohjelmat ovat tyypillisesti omia itsenäisiä kokonaisuuksiaan poiketen geoteknisen suunnittelun tutkimusohjelmista, jotka sisältävät yleiset ohjeet ja niitä täydennetään tutkimuspisteet sisältävillä tutkimuspiirustuksilla. Kalliotutkimusohjelmien suhteen alalla yleisesti käytetystä mallista ei ole tarpeen poiketa.

Tutkimusohjelmakokonaisuudesta tulee käydä ilmi, että Liikenneviraston kalliotunnelien tutkimuksissa tulee noudattaa soveltuvin osin Liikenneviraston ohjetta 10/2015 *Geotekniset tutkimukset ja mittaukset*.

Kaikkien tutkimusohjelmien selostusosan tulee aina sisältää ainakin seuraavat asiat:

- Tilaaajan yhteystiedot
- Tiedot tutkimuksen kohteesta ja tutkimuksen suorittajaa palvelevaa johdantoa/taustaa tutkimukselle
- Tutkimuksen suunnittelijan yhteystiedot ja ohjeet yhteydenpidosta
- Ohjelmoinnissa käytetty koordinaattijärjestelmä ja korkeusjärjestelmä
- Päivämäärä ja laatijan nimi
- Yhteyshenkilöiden tiedot
- Ohjeet raportoinnista ja aineiston säilyttämisestä
- Mittausten menetelmät ja mitattavat asiat
- Selvitysvelvollisuudet ja vastuut:
 - o Maininta, että alueella sijaitsevien johtojen ja putkien sijainti on selvitetävä ennen kalliotutkimustöiden suorittamista sekä maininta siitä kenen tehtäviin kuuluu näiden selvitys ja näytön hankkiminen
 - o Maininta siitä kuka vastaa mahdollisiin johtoihin/kaapeleihin kohdistuvista tai töistä aiheutuvista vaurioista
- Kuvaus mittauspisteiden sijainnista
 - o Lisätietoja mm. paikan sijainnista ja kohteelle pääsyä rajoittavista tekijöistä

Erityisesti kairausta sisältävän tutkimusohjelman selostusosan tulee edellisten lisäksi sisältää ainakin seuraavat asiat:

- Kallionäytekairauksissa SFS-EN ISO 22475-1 mukainen kairausluokka (Liikenneviraston töissä lähtökohtaisesti C)
- Maininta kairausmenetelmissä kalustosta ja sen kalibroinnista, esim. ”Kaikki kairauksiin käytetty kalusto tulee dokumentoida ja kaikista tutkimuksissa käytetystä kalustosta tulee tilaajan pyydetessä esittää kalibrointitodistus.”

- Kuvaus mittauspisteiden sijainnista
 - o Maininta tutkimuspisteen sijainnin siirron reunaehdoista ja rajoituksista esim. ”Tutkimuspisteen merkittävästä (yli 3 m) siirrosta on sovittava ennakkoon tutkimuksen suunnittelijan kanssa.”
 - o Maininta kuinka toimitaan, jos kohteessa selviää, että tutkimuspistettä ei voi toteuttaa, esim. ”Mahdollisesti tekemättä jääneet kairaukset ja perustelu tulee raportoida tilaajalle.”
 - o Kairauksissa maininta maaputken käytön tarpeesta (esim. katualueilla maaputkella voidaan estää rakennekerrosten sekoittuminen huuhtelun seurauksena)
- Tutkimuksen päättämisen edellyttämistä toimenpiteistä
 - o Maininta tutkimusalueen ennallistamiseen, esim. ”Tutkimuspisteen ja -paikan kunnostaminen alkuperäiseen kuntoon kuuluu tutkimukseen. Reikäsoija kerätään talteen tai pestään pois sekä maakairauksen osuus täytetään esim. hiekoitussepelillä ja valmis pinta paikataan siististi pinnan värisellä ja laatuaisella materiaalilla.”
 - o Maininta katualueen yms. rakennekerrosten vaurioittamisen ehkäisystä
 - o Maininta töistä ennen reiän sulkemista, esim. ”Ennen kairareian täyttämistä varmistetaan tutkimuksen suunnittelijalta, että kaikki reikään suunnitellut tutkimukset on suoritettu.”
 - o Maininta reiän kallio-osuuden täyttämisestä, esim. ”Reikä täytetään pohjalta alkaen SFS-EN ISO 22475-1 kohdan 5.5.4 mukaisesti kallio-osuudelta stabiililla sementtisuspensiolla (vesi/sementti -suhde n. 1:1 + notkistin). Reikien täytöstä on toimitettava em. standardin mukainen pöytäkirja, josta käy ilmi mm. täyttöön käytetyt massamäärät. Täyttäjän on kuitattava pöytäkirja allekirjoituksellaan.”
- Tulosten esittäminen ja raportointi
 - o Raportointiformaatti (esim. kaikissa kairauksissa Infra-pohjatutkimusformaatti)
 - o Tarvittaessa huomautus, että suunnittelijalle on varattava mahdollisuus tutustua näytteisiin mahdollisimman nopeasti tutkimuksen päättymisen jälkeen
 - o Tutkimuspisteiden koordinaatit ja korkeus mitataan. Käytettävä koordinaatistojärjestelmä ja korkeusjärjestelmä on ilmoitettava.
 - o Laadunvarmistusmenetelmät (esim. kairareian suoruusmittaukset)
 - o Pohjatutkimuskonsultin tulee raportoida tutkimusten edistymisestä jokaisen tutkimustulosten toimituserän yhteydessä. Raportista on käytävä selville, mitkä tutkimukset on tehty ja mitkä ovat vielä tekemättä. Samassa yhteydessä on suositeltavaa kirjata ne tutkimukset, jotka ovat jääneet tekemättä ja syy siihen. Suositeltava raportointimuoto on tutkimusten pistekohtainen seurantataulukko.

Tutkimusohjelman suunnitelmapiirustuksen on hyvä sisältää kohteen vaatimassa laajuudessa seuraavat asiat:

- karttapiirros/pohjapiirustus, tarvittaessa sijaintikaavio
- olemassa olevat ja louhittavat maanalaiset tilat
- tarvittaessa tieto kulkuyhteyksistä kohteeseen
- tutkimuspisteet ja -linjat numeroituina sekä merkintöjen selitys
- suunniteltujen mittauspisteiden sijaintitiedot (esim. koordinaattipisteet)
- tarvittaessa kiintopisteet
- tarvittaessa alueen johto- ja putkitiedot
- tutkimusohjelman sisältämien tutkimusten mahdollinen suorittamisjärjestys

Kallioperätutkimuksia ohjelmoitaessa on huomioitava lisäksi ainakin seuraavat asiat:

- suunnitteluvaihe ja -tilanne
- maaperä- ja kallio-olosuhteet
- pohjavesiolosuhteet
- kasvusto, maasto sekä alueen johto- ja putkitiedot
- kohteen läheisyydessä olevat maanpäälliset rakennukset, rakenteet ja maanalaiset tilat
- lisäksi on hyvä olla yhteydessä esim. lähikiinteistöjen isännöitsijöihin/huoltoon, jos heillä on tiedossa joitakin esim. putkia tai johtoja, jotka eivät näy aineistossa tai onko jotain rakenteita, joita ei näy olemassa olevien rakennusten suunnitelmassa
- on hyvä käydä maastossa vielä toteamassa, että tutkimusohjelman kairauspisteet ovat toteutettavissa.
- tutkimuslupa
 - o maanomistajan lupa
 - o maanhaltijan lupa
 - o viranomaisten lupa
 - o ympäristövaikutukset

3.5.3 Menetelmäkohtaiset lisäykset tutkimusohjelmiin

Seuraavissa kappaleissa on lueteltu vielä kunkin tutkimusmenetelmän kohdalla edellä esitettyä täydentäviä asioita, jotka tulisi huomioida tutkimusohjelmaa laatiessa ja tarvittaessa sisällyttää tutkimusohjelmaan.

3.5.3.1 Porakonekairausten tutkimusohjelma

Porakonekairausta ei ole tarkalleen menetelmänä määritelty Eurokoodi 7:ssä, osassa 2. Kuitenkin tulosten tulkintaa käsitellään EC7-2:ssa. Tutkimuspisteiden välisten etäisyyksien ja tutkimussyvyyksien suositusesimerkkejä liitteessä B, mutta se ei sovellu kalliotunnelin suunnitteluun.

Porakonekairausten tutkimusohjelmassa esitetään tai mainitaan kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- yleisviittaus standardiin SFS-EN ISO 22475-1 sekä viittaus SGY:n kairausoppaaseen V (porakonekairaus)
- aika-tunkeumahavaintojen tekeminen kallio-osuuksilla (yleensä s/0,2m)
- maininta, että lohkat merkitsevät tulostustiedostoon
- maininta, että maakerrosten rajat ja maalajit on arvioitava ja kirjattava tulostustiedostoon
- kairauksen päättymissyvyys ja päättymistapa
- ohjeet mahdollisesta häiriintyneiden maanäytteiden otosta ja on määritettävä näytteenottoluokka sekä laatuluokka
- huomio, että esim. mahdollisesti tekemättä jääneet kairaukset ja perustelu tulee raportoida tilaajalle
- listaus näytteille laboratoriossa tehtävistä tutkimuksista
- ohjeistus tilaajalle toimitettavasta aineistosta esim. kairautiedosto ja näytetiedosto Infra-pohjatutkimusformaattissa 2.3 (SGY ohje 204), laboratoriolomakkeet pdf-tiedostoina
- ohjeistus miten raportoidaan tilaajalle tutkimusten etenemisestä / valmiusasteen ilmoittamien esim. kuukausittain
- määriteltävä reiät, jotka täytetään kokonaan tai kallio-osuudelta
 - o tarvittaessa reiän kallio-osuuden täyttö standardin SFS-EN 22475-1 kohdan 5.5.4 mukaan

Porakonekairauksia tulisi suunnitellun kalliotunnelin kohdalla ohjelmoida siten, että niiden etäisyys toisistaan olisi sama tai pienempi kuin oletettu ohuin kallioikaton pak-suus. Tätä nyrkkisääntöä sovelletaan rakentamisvaihetta edeltäviin suunnitteluvaiheisiin asteittain. Porakonekairauksia sijoitetaan esim. tunnelien otsien kohdille tälle periaatteella. Lisäksi tulevien kuilujen sijainnit on hyvä tutkia porakonekairauksilla, esim. yksi piste kuilun keskelle ja pisteet kuilun nurkkapisteisiin.

Kaupallisena asiana tulisi varmistaa, että asiakirjoissa on maininta maahan/kallioon jääneiden kairankärkien, tankojen ja vastaavien korvausvastuu (yleensä tilaaja ei korvaa).

3.5.3.2 Kallionäytekairausten tutkimusohjelma

Eurokoodi 7, osa 2 (Pohjatutkimus ja koestus), luku 3 määrittää kallionäytteiden oton kairaamalla. Tarkentava standardi on SFS-EN ISO 22475-1, joka pätee kaikkeen geotekniseen näytteenottoon (maanäyte, vesinäyte, kallionäyte). Tutkimusohjelmiin vietävä aina vähintään viittaus standardiin SFS-EN ISO 22475-1.

Kallionäytekairausohjelmissa on lisäksi vaadittava kairausnäytteiden käsittely SFS-EN ISO 22475-1 mukaan ja esitettävä SFS-EN ISO 22475-1 mukainen näytteenottoluokka (A, B tai C). Kallionäytekairausohjelmissa on esitettävä, että reiän kallio-osuuden täyttäminen suoritetaan SFS-EN ISO 22475-1 kohdan 5.5.4 mukaan.

Eurokoodi 7:n osa 2 (SFS-EN 1997-2), luku 3.5.2 käsittelee kallion tunnistamista. Kohdan mukaan kallion tunnistaminen tulee tehdä standardin SFS-EN ISO 14689-1 mukaan. EC7-2 liite U tarkentaa kalliomateriaalin tunnistamista. EC7-2 tuntee em. standardin lisäksi RQD-luokituksen, mutta ei RG- tai Q-luokitusta. EC7-2 liite U kohta U.2: Muitakin julkaistuja ja paikallisesti hyväksytyjä luokitusjärjestelmiä voidaan käyttää, mikäli raportista käy ilmi jäljitettävissä oleva viittaus. Toisin sanoen, jos kallionäytekairauksesta halutaan määritettävän RG- tai Q-lukujärjestelmän parametreja, tulee tutkimusohjelmaan laittaa viittaus em. järjestelmiin.

Kallionäytekairausten tutkimusohjelmaa laadittaessa on huomioitava seuraavat:

- kohteen ympäristön tekijät ja kairausta rajoittavat tekijät (mm. ahtaat tilat rakennusten kellareissa)
- kallio-olosuhteet (kalliopinnan topografia, rakoilusysteemi, heikkousvyöhykkeet liuskeisuus) ja maaperäolosuhteet
- kallionäytekairauksia on mahdollisuuksien mukaan ohjelmoitava useammasta suunnasta
- kohteessa käytettävälle kairauskalustolle soveltuvat kaltevuuskulmat, vaihtelee laitekohtaisesti, asia on tarkistettava tutkimusurakoitsijalta
- kulkuyhteydet kairauskohteille
- pohjavesiolosuhteet (vesimenekikokeen painetaso)
- suunnittelutilanne ja kalliotunnelin linjauksen/kalliotilan layoutin vaikutus
- kairareikämäärää harkittaessa on otettava huomioon kohteen laajuus ja kallion mahdolliset heikkousvyöhykkeet

Tutkimusohjelmassa kallionäytekairauksista esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- yleisviittaus standardiin SFS-EN ISO 22475-1
 - o em. standardin mukainen näytteenottoluokka (A, B tai C)
 - o kallionäytteiden säilytys
 - o reiän kallio-osuuden täyttö standardin SFS-EN 22475-1 kohdan 5.5.4 mukaan.
- viittaus käytettäviin kallioluokitusjärjestelmiin (Q, RG)
 - o Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen (Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 25, 1976)
 - o Handbook: Using the Q-System, rock mass classification and support design
<https://www.ngi.no/eng/content/download/4014/431191/version/1/inLanguage/nor-NO/file/Handbook%20The%20Q-system%20ma%202015%20nettutg.pdf>
- kairauksessa käytettävä teräskoko tai näytteen halkaisijan minimikoko
 - o yleisimmin käytetty ja suositeltava teräskoko (\varnothing) on 76 mm
 - o jos kallionäytekairausnäytteestä halutaan teettää laboratoriokokeet, ks. näytteen vaatimukset SFS-EN 1997-2 + AC, Liite W.
- tutkimuspisteiden koordinaattipisteet, kairaussuunnat, kaltevuudet ja kairauspituus
- leikkauspiirustus, josta käy ilmi se, miten kairaukset sijoittuvat suunnitteilla oleviin kalliotiloihin
- reiät, joissa tehdään vesimenekkikokeet ja vesimenekkikokeiden tulppaväli ja menetelmäkuvaus
 - o esim. vesimenekkikokeet tehdään kairauksen yhteydessä 1-tulppamenetelmällä kolmen paineen sarjana 6 m:n jaksoissa. Käytettävä painesarja on 0,3–0,5–0,3 MPa yli luonnollisen pohjaveden paineen ja koeaika/paine on 10 min. Mikäli vesimenekki vastaa yli 10 Lugeonin virtausta, voidaan pumppausaika lyhentää esim. viiteen (5) minuuttiin.
 - o epäiltäessä vedenjohtavuutta sisältävän heikkousvyöhykkeen lävistämistä, voidaan vesimenekkikokeen tulppaväliä pienentää huomattavasti esimerkiksi kahteen metriin.
- suunnatut näytteet ja ohjeistus
 - o esim. näyte suunnataan 6 m välein. Jos suunnan merkitseminen epäonnistuu 2 kertaa peräkkäin, tehdään uusi suunta seuraavasta nostosta. Jos suunnan merkitseminen ei onnistu seuraavassakaan nostossa, tulee ottaa yhteys suunnittelijaan ja toimittaa hänelle valokuvia kairasydäimestä.
 - o esim. kallio-osuudella tehdään reiän sivusuunta-, sijainti- ja kaltevuusmitaukset ja määritetään näytteen koordinaatit 3 m välein ja reiän pohjalta.
- näytekoko, jos erityisvaatimuksia
- ohjeet mikäli törmätään kairauksella heikkousvyöhykkeeseen
- muistutus kallionäytekairaus reiän täyttämisestä
- ohjeet kallionäytekairausreiän tulosten raportoinnista (valokuvaus ja loggaus, loggauksen osalta tarkasti mitä logataan)
 - o esim. tutkimusraportissa esitetään kairauksen todellinen, mitattu sijainti. Kallionäytteiden geologinen analysointi, valokuvaus ja raportointi sisältyvät työhön. Raportointi tehdään rakennusgeologisen kallioluokituksen ja Q-luokituksen mukaan
- kallionäytekairaukset edellytettävä raportoitavaksi myös Infra-pohjatutkimusformaattissa (SGY ohje 204)

3.5.3.3 Jännitystilamittausten tutkimusohjelma

Yleisesti käytettyjä jännitystilamittausmenetelmiä ovat hydraulisen murtamisen menetelmä sekä irtikairaukseen perustuvat menetelmät, joista nykyaikaisin on LVDT-kennolla tehtävä jännitystilamittaus. Aiemmin käytettyjä Hastin kennoja tai venymäliuskoihin perustunutta Leemanin kennoa ei käytännössä enää käytetä perinteisessä rakentamisessa. LVDT-kennolla tehtävä mittaus tehdään toistaiseksi vain olemassa olevista kalliotiloista käsin, kun hydraulisen murtamisen menetelmän voi tehdä myös tutkimusreiässä.

LVDT-menetelmään perustuvassa tutkimusohjelmassa esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- ensisijainen mittauspaikka sekä mahdollisuuksien mukaan vaihtoehtoiset mittauspaikat
- minimimäärä onnistuneille jännitystilamittauksille
- maininta kohteen katselmoinnista ennen mittauksia
- mittauksen edellyttämien lupien ja järjestelyiden (esim. liikennöinti) hankinta- ja suoritusvastuu
- tieto, mistä tiloihin saadaan mittausta varten juokseva vesi ja sähkö
- mahdolliset muut mittaukseen kuuluvat tehtävät (vastuu toteutuksesta):
 - o esim. reikien kairaus sekä reikämittaukset, mittauskohdan 3D-fotogrammetriakuvaus, kallion kimmo-ominaisuuksien määrittäminen biaksoilla litestauksella, inversiolaskenta
- huomio, että kallion kimmo-ominaisuuksien määrittäminen tehdään niistä kairanäytteistä, jotka syntyvät jännitystilamittausprofiiliin
 - o esim. yksi jännitystilamittaus käsittää viisi overcoring-mittausta tunneliprofiilin välittömässä läheisyydessä.
- huomautus, että mittausreikien syvyyden mittausurakoitsija valitsee menetelmälleen parhaiten soveltuen huomioiden tilassa vallitsevan luonnolliset rakoukset ja louhinnan rikkoutumisvyöhykkeen.
- ohjeet raportoinnista, kuitenkin vähintään vaadittava raportointaan jännityskentän suuruus ja suunnat sekä kallion kimmo-ominaisuudet.
- tilaajan ja suunnittelijan yhteyshenkilöt

Hydraulisen murtamisen menetelmään perustuvassa tutkimusohjelmassa esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- mittausten määrä reiässä (yleensä n. 10 kpl)
- mittauspaikkojen valintaprosessi (esim. geologi määrittää kairasydännäytteiden perusteella) sekä yleisiä edellytyksiä sille (esim. mittauksen tasoväli, vaatimukset rakovälille)
- ohjeet raportoinnista, kuitenkin vähintään vaadittava raportointaan jännityskentän suuruus ja suunnat

3.5.3.4 Seismisten luotausten tutkimusohjelma

Seismisten luotausten tutkimusohjelmassa esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- ”sidontapisteet” eli alueella jo toteutetut kalliopinnan varmistamiseksi tehdyt kairaukset esim. porakonekairaus- ja/tai kallonäytekairauspisteiden sijainnit tai vastaavasti ohjelmoidaan sellaiset osana tutkimusta
- tutkimuslinjat sekä merkintöjen selitys

Seismisten luotausten osalta on sovittava tulosten toimitusmuoto tutkimuskonsultin kanssa, jotta tulosten hyödynnettävyys voidaan varmistaa.

3.5.3.5 Maatutkaluotausten tutkimusohjelma

Maatutkaluotausten tutkimusohjelmassa esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- ”sidontapisteet” eli alueella jo toteutetut kalliopinnan varmistamiseksi tehdyt kairaukset esim. porakonekairaus- ja/tai kallionäytekairauspisteiden sijainnit tai vastaavasti ohjelmoidaan sellaiset osana tutkimusta
- tutkimuslinjat sekä merkintöjen selitys

Maatutkaluotausten osalta on sovittava tulosten toimitusmuoto tutkimuskonsultin kanssa, jotta tulosten hyödynnettävyys voidaan varmistaa.

3.5.3.6 Maavastusluotauksen tutkimusohjelma

Maavastusluotauksen tutkimusohjelmassa on mainittava:

- ”sidontapisteet” eli alueella jo toteutetut kalliopinnan varmistamiseksi tehdyt kairaukset esim. porakonekairaus- ja/tai kallionäytekairauspisteiden sijainnit tai vastaavasti ohjelmoidaan sellaiset osana tutkimusta
- haluttu syvyysulottuvuus ja resoluutio

Maavastusluotausten osalta on sovittava tulosten toimitusmuoto tutkimuskonsultin kanssa, jotta tulosten hyödynnettävyys voidaan varmistaa.

3.5.3.7 Painovoimamittausten tutkimusohjelma

Painovoimamittausten tutkimusohjelmassa esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- ”sidontapisteet” eli alueella jo toteutetut kalliopinnan varmistamiseksi tehdyt kairaukset esim. porakonekairaus- ja/tai kallionäytekairauspisteiden sijainnit sekä linjalle osuvien tunnettujen avokallioalueiden sijainnit tai vastaavasti ohjelmoidaan sellaiset osana tutkimusta
- Tutkimuslinjat sekä merkintöjen selitys

Painovoimamittausten osalta on sovittava tulosten toimitusmuoto tutkimuskonsultin kanssa, jotta tulosten hyödynnettävyys voidaan varmistaa.

3.5.3.8 Optisen kuvantamisen tutkimusohjelmat

Tutkimusohjelmassa OBI- ja ABI-kuvauksista esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:

- määritellään mittauksen parametrit (pisteväli pystysuunnassa, resoluutio vaakasuunnassa)
- edellytys kairareikien pesemisestä erityisesti ennen OBI-kuvusta, pesu yleensä sisällytetään kairaustyöhön

3.5.3.9 Laboratoriotutkimusten tutkimusohjelma

Laboratoriotutkimuksia varten ISRM on laatinut eri tutkimustavoille ja määrittäyksille suositukset, jotka koskevat laitteita, näytteiden kokoa ja käsittelyä. Nämä suositukset

ovat muotoutuneet alan standardiksi, jonka suuntaan palveluntuottajatkin ovat toimintaansa kehittäneet, joten ISRM:n suositusten noudattamista tulisi vaatia myös Liikenneviraston kohteissa.

Kalliorakennuskohteissa määritetään tyypillisesti seuraavat parametrit:

- yksiaksiaalinen puristus- ja muodonmuutuskoe
- pistekuormituskoe
- suora leikkauskoe
- Brasilia-koe
- kolmiaksiaalinen puristuskoe

Tutkimusohjelmassa esitetään:

- koestettavat näytteet
- koenäytteiden valmistelu
- kokeiden lukumäärä muodostumaa kohti
- mahdollisesti vaadittavat lisäparametrit
- koemenetelmät
- koemenetelmäriippuvaiset vaatimukset (määritelty kunkin kokeen kohdalla)
- koenäytteen käsittelyssä huomioitava liite T (SFS EN 1997-2 + AC)
- näytteen valmistelu EC7-2 liitteen T mukaisesti.
- kokeen suoritukseen EC7-2 liitteen W kohtia valitun kokeen perusteella

Menetelmistä enemmän SFS EN 1997-2 + AC:n liitteessä W – kalliomateriaalin lujuuskokeet (mm. kokeiden lukumäärä).

3.5.4 Muita huomioitavat asioita

Välittömästi kohteen yläpuolella olevista rakennuksista ja rakenteista selvitetään yleensä perustamistapa ja -taso sekä tarvittaessa perustusten kunto. Näiden jälkeen arvioidaan jatkotutkimustarve sekä rakennuksen painumisriski.

Olemassa olevista maanalaisista kalliotiloista pyritään määrittämään seuraavat asiat:

- kalliooperän Q-luku, RQD -luku ja kivilajien määrittäminen
- alueen heikkousvyöhykkeet
- rakosuuntien lukumäärä, rakopituus
- vesivuotojen paikantaminen ja vuotovesimäärät
- mahdolliset vauriot esim. ruiskubetonipinnassa

Rakenneporauksilla ja koekuopilla voidaan selvittää mm. rakennusten perustamistapoja.

- Koekuoppatutkimukset on ohjeistettu Liikenneviraston ohjeessa 10/2015. Tutkimusohjelmassa koekuopista esitetään kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:
 - o koekuoppien sijainti sekä ohje kuinka laaja alue kaivetaan esiin
 - o ohjeet kuoppien valokuvauksesta ja ohjeet esim. perustuslinjan mitauksista
 - o ohjeet mitä seikkoja kirjataan muistiin kaivutyön yhteydessä.
- Rakenneporauksien tutkimusohjelmassa esitetään yleensä kohdassa 3.5.2 esitettyjen lisäksi:
 - o koeporausten sijainti ja numerointi sekä ohjeet poraukselle
 - o ohjeet mitä seikkoja kirjataan muistiin porauksen yhteydessä
 - o ohjeet porauksen esim. valokuvauksesta/videokuvauksesta

3.5.5 Pohjavesitutkimukset

Perinteiset pohjaveden seurantamittaukset ja niiden suunnittelu on ohjeistettu Liikenneviraston ohjeessa 10/2015. Kalliotunnelin rakentamisessa pohjaveden painekorkeuden ja pinnan korkeuden taso ja vaihtelu ovat asioita, joista tulee olla tietoinen mitaustuloksien perusteella. Vedenpainetta voi mitata porareiässä pietsometreillä, mutta painekorkeuden mittaaminen onnistuu myös pohjaveden pinnankorkeutta mittaamalla. Pohjaveden pinnan korkeutta voidaan seurata porarei'istä tai maapeitteeseen asennetuista pohjavesiputkista. Pohjavesitutkimuksissa muutetaan tietyn pisteen pohjavesiolosuhteita (vedenpaine, veden korkeus) ja alkuperäisen tilanteen palauttamiseen kuluva aika tai uusien olosuhteiden ylläpitämiseen tarvittava vesimäärä mitataan. Mittaukset suoritetaan porarei'issä, joista tietty osa on eristetty tulpilla (Matikainen, Särkkä, Johansson 1982). Mittaukset voidaan tehdä myös avorei'issä, kun vedenjohtavuus on hyvä. Mittausjärjestely suunnitellaan yleensä maan pinnalta käsin tehtäviin reikiin, mutta myös tunnelista porattuihin yläkätisiin reikiin on asennettu painekorkeutta mittaavat mittausteistot.

Kalliorakennussuunnittelussa on selvitettävä rakentamisen aiheuttamat pohjaveden muutoksiin liittyvät suorat ja välilliset riskit. Ennen louhintaa tulisi selvittää muun muassa kalliorakennuskohteen viereisten rakennusten perustamistavat, alueella mahdollisesti olevien kalliotilojen sijainti, alueen sadanta, pohjaveden pinnan korkeus sekä virtaussuunta ja sen mahdollinen muutos tunnelin rakentamisen seurauksena. Lisäksi tulisi selvittää, kuinka suuri osa sadannasta imeytyy maaperään ja kallioperään, ja kuinka suuri osa haihtuu pois tai valuu muualle ympäristöön esim. katualueen kuivatusjärjestelmiin, jotta pohjaveden luonnollinen korvautuvuus voidaan arvioida. Myös korkeusvaihtelu on tärkeä parametri, jotta luonnollinen vaihtelu voidaan ymmärtää analysoitaessa louhinnan aikaisia vaihteluita. Pohjaveden potentiaalinen määrä kallioperässä riippuu kallion rakojen ja rakorakenteiden sisältämästä avoimesta tilavuudesta, joka on riippuvainen rakomäärästä sekä rakojen hydraulisesta avaumasta. Kallioperän sisältämä pohjaveden määrä kalliotunnelin vaikutusalueella ei siis ole suuri. Pohjaveden todellinen määrä kallioperässä riippuu näiden lisäksi sadannan ja haihdunnan määrästä sekä irtomaakerroksissa olevasta veden määrästä.

Maa- ja kalliopohjaveden korkeusasema on määritettävä suunnitellun tunnelin vaikutusalueella. Määritystä varten on asennettava riittävä määrä havaintoputkia, joista orsi- ja pohjaveden pinnan korkeusaseman vaihteluita seurataan riittävän laajasti jo suunnitteluajana. Samoja havaintoputkia on käytettävä vesipintojen tarkkailuun rakentamisen aikana ja tarvittaessa myös rakentamisen jälkeen (RATO18).

Pohjaveden kemialla on myös vaikutusta kalliorakentamiseen, lähinnä betonirakenteiden säilyvyyteen, sillä kallion mekaaniset lujitusrakenteet joutuvat usein suoraan kontaktiin kalliossa virtaavan pohjaveden kanssa. Tämän vuoksi tunnelin suunnittelussa tulee olla käsitys tunnelia ympäröivässä kalliomassassa liikkuvan pohjaveden aggressiivisuudesta. Pohjavesinäytteenotto kallioperästä voidaan tehdä joko kallioon poratusta tai kairatusta reiästä tai olemassa olevan kalliotilan vesivuotokohdista.

Näytteitä otettaessa tulee varmistua, että näyte edustaa tunnelin vaikutusalueella olevaa kalliopohjavettä eikä esimerkiksi pintasadantaa tai kallioreiän (kallionäytekairaureiän) tutkimuksissa kallioon pumpatusta vedestä (esim. vesimenekkikoe). Pohjavedestä tulisi suunnitella määritettävän vähintään pH, aggressiivisen hiilidioksidin pitoisuus (CO_2), sulfaattipitoisuus (SO_4^{2-}), ammoniumpitoisuus (NH_4^+) ja magnesiumipitoisuus (Mg^{2+}). Suositeltavaa on edellyttää tutkimaan myös pohjaveden arseenipitoisuus,

lämpötila, väri, suolapitoisuus, sameusaste ja vedenjohtavuus. Vedenjohtavuus, lämpötila, vedenjohtavuus ja pH tulisi tutkia sekä heti näytteenottohetkellä, että laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriotutkimukset tulee tutkimusohjelmissa edellyttää suoritettavaksi Finas-akkreditoidussa laboratoriossa.

Toisinaan suunnittelualueelle on tarpeen laatia numeerinen pohjaveden virtausmalli. Virtausmallilla voidaan simuloida ja arvioida suunniteltujen rakentamistoimien työaikaisia ja pysyviä vaikutuksia.

Suosittelvat tutkimusmääriä on käsitelty kappaleessa 3.8 .

Viittaukset olemassa oleviin ohjeisiin on esitelty tämän selvityksen kohdassa 3.2 ja dokumentointia ja arkistointia ja käsitelty kohdassa 3.9 . Radonin hallintaa tunnelissa on käsitelty kappaleessa 5.7 .

Tutkimusohjelmissa tulisi pyrkiä viittaamaan mahdollisimman kattavasti standardiin SFS-EN ISO 22471-1, riippuen tehtävästä tutkimuksesta.

3.6 Kalliomekaanisen seurantaohjelman laadinta

Kalliomekaanisen suunnittelun oleellisen osan muodostavat kalliotilan seurantamittaukset. Kallioliikkeet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: yksittäisen kalliolohkon liikkeet ja laajemmat kalliomassan liikkeet jännitystilan jakautuessa uudelleen. Kalliotiloissa painovoima aiheuttaa lohcareiden putoamista katosta tai seinistä. Louhittussa tilassa on ns. avainlohkoja, jotka estävät muiden lohcareiden sortumisen (progressiivinen sortuma). Jännitystilan aiheuttamissa sortumissa olennaisin tekijä on kalliotilan reunaan muodostuva reunajännitys, jota kutsutaan tangentiaali-jännitykseksi.

Hankkeen suuruus ja luonne vaikuttavat valvontamittaustarpeeseen sekä samalla myös mittausmenetelmien valintaan. Suuret kaupunkialueilla sijaitsevat kalliorakennuskohteet ovat yleensä vaativimpia seurannan kannalta.

Kalliomekaaninen valvonta tulee aloittaa hyvissä ajoin ennen louhintaa ja vaativissa kohteissa sitä jatketaan useita vuosia louhinnan jälkeen. Siirtymät tasoittuvat yleensä heti kun louhintaa on loppunut. Rakentamisen jälkeen tehtävillä mittauksilla selvitetään rakentamisen pitkäaikaisvaikutuksia.

Yleisimmin käytettyjä seurantamittausmenetelmiä ovat siirtymä-, kuormitus-, lämpötila- ja jännitystilamuutosmittaus sekä pohjaveden pinnan korkeuden seurantamittaus. Kallion siirtymän mittaamiseen käytetään seuraavia menetelmiä: tarkkavaaitus, konvergenssimittaus ja ekstensometrimittaus. Kalliopulttien kuormitusta voidaan mitata ns. kuormituspulteilla, joissa mittausjärjestely perustuu venymäliuskaan.

Kallion siirtymämittausten filosofia on varmistaa tehtyjen kalliomekaanisten laskelmien oikeellisuus. Kun oikeellisuus voidaan todentaa muutamissa mittauspisteissä, voidaan olettaa, että laskelma pätee myös mittauskohtien ulkopuolella. Pääperiaate valvontamittalaitteiden ja mittapisteiden sijoittelussa on muodostaa mittausleikkauksia kalliomekaanisen käyttäytymisen kannalta oleellisiin kohtiin. Pääpaino on useimmiten risteysalueilla, missä ovat suurimmat jännevälit, ohuen kalliokaton alueilla sekä

kalliopilareissa. Mittalaitteet asennetaan siten, että valvontamittausten suorittaminen onnistuu myös käyttövaiheen aikana. Mittalaitteet asennetaan hyvissä ajoin ennen louhintojen aloitusta ja ensimmäiset mittaukset tulee tehdä heti laitteiden asennuksen jälkeen. Mittauksia tulee tehdä riittävä määrä, jotta saadaan tyydyttävä lähtöarvo ennen kuin louhinta etenee mittalaitteiden läheisyyteen. Tämä ei ole nykyaikaisen tiedonsiirron ja automaattisen mittauksen aikana enää ongelma, kuten vielä 2000-luvulla.

Kalliorakennuskohteiden seurantamenetelmiä on hyvin suuri joukko, mutta mittauskohteensa puolesta ne jakaantuvat melko pieneen joukkoon mitattavia asioita. Kussakin mittaryhmässä on myös omat tyypillisimmät edustajansa. Tyypillisiä mitattavia asioita ovat:

- suora liikkeen mittaus, esim. ekstensometrit
- kaltevuuden muutosten mittaus, esim. inklinometrit
- kuormitusmittaus, esim. venymäpultit
- jännitystilän muutosten mittaus, esim. kiinteästi asennetut irtikairauskennot

Siirtymämittauksissa on tärkeää, että mittausjärjestelmässä on ”kiinteitä” pisteitä, joiden suhteen mittaukset voidaan tulkita. Mittalaitteiden tulee olla varmoja toiminnaltaan ja luotettavia. Mittalaitteet on pyrittävä asentamaan siten, että niistä aiheutuu mahdollisimman vähän haittaa ympäristölle ja itse louhinnalle. Erityisesti ekstensometrit tulee varustaa lämpötilamittausjärjestelmällä per tanko, jotta lämpötilan muutoksien vaikutukset mittauksiloksiin voidaan poissulkea (tällaisia on esim. louhitun tilan lämpötilamuutokset tai avautuvan kallioraon aikaansaama ympäröivän kalliomasan lämpötilasta poikkeavan veden virtaus avautuneessa raossa).

Tyypiesimerkit ja tavallisimmat käyttökohteet kalliomekaanisista seurantamenetelmistä on esitelty taulukossa (Taulukko 7).

Kalliomekaaninen seurantaohjelma koostuu tekstiosasta ja suunnitelmapiirustuksista. Kalliomekaanisen seurantaohjelman tekstiosan tulee sisältää kohteen vaatimassa laajuudessa seuraavat asiat:

- seurantaohjelman taustatiedot, tavoite ja tilaajan yhteystiedot
- käytettävien menetelmien ja laitteiden kuvaus sekä ohjeet laitteiden sijoittelusta ja asennuksesta sekä lisätietoja mm. paikan sijainnista ja kohteelle pääsyä rajoittavista tekijöistä.
- ohjeet kalliomekaanisen seurannan aloitusajankohdasta, mittaustiheydestä/suorittamisesta ennen louhintaa, louhinnan aikana, rakennustöiden aikana ja niiden jälkeen sekä poikkeamatilanteessa

Kalliomekaanisen seurantaohjelman suunnitelmapiirustuksen tulee sisältää kohteen vaatimassa laajuudessa seuraavat asiat:

- pohjapiirustus/kartta, johon on lisätty olemassa olevat ja suunnitellut/louhittavat maanalaiset tilat sekä tarvittaessa sijaintikaavio.
- asennettavien mittalaitteiden paikat, symbolit ja symbolien selitykset

Kalliomekaanisesta seurantaohjelmasta tulee arvioida seurantamenetelmien tarkoituksenmukaisuus ja soveltuvuus ko. suunnittelukohteeseen. Huomiota tulee kiinnittää seuraaviin seikkoihin:

- laitteiden sijainnit ja asennettavuus, pääsy kohteeseen
- asennuksen ajankohta
- laitteiden määrät ja suuntaus
- tarkastusmittaukset ennen louhintaa ja mittausten aloitusajankohdan ja mitaustiheyden (mittauskertojen) määrittäminen
- ohjeet yhteydenpidosta

Seurantaohjelman lisäksi rakennustyömaalle tulee laatia tutkimuslaitteiston varoaluepiirustus. Hyvä vakiintunut tapa on ollut esittää tutkimuslaitteiston sijainti kaikissa alueen suunnitelmapiirustuksissa tai malleissa (louhinta, lujitus, tiivistys).

Taulukko 7. Kalliomekaaniset seurantamenetelmät ja niiden käyttökohteet. Taulukossa • = erittäin suositeltava, o = suositeltava ja - = ei tarpeellinen.

Kohde	Seurantamenetelmä						
	Kalliolaadun seuranta	Ekstensometri-mittaus	Konvergenssi-mittaus	Tarkkavaaitus	Kuormitus-pultti	Jännitystilän seuranta	Pohjaveden seuranta
Tunneli (jänneväli < 10m) tiiviisti rakennetussa kaupunkiympäristössä	•	o	-	-	o	-	o
Suuri halli/monimutkainen geometria/risteävät maanalaiset tilat	•	•	•	•	•	•	•
Suuri halli/yksinkertainen geometria	•	•	•	o	o	o	•
Pieni halli/monimutkainen geometria/risteävät maanalaiset tilat	•	o	o	o	o	o	•
Pieni halli/yksinkertainen geometria	•	o	-	-	-	o	•
Monimutkainen kohde tiiviisti rakennetussa kaupunkiympäristössä	•	•	•	•	•	•	•
Yksinkertainen kohde tiiviisti rakennetussa kaupunkiympäristössä	•	•	o	-	o	•	•
Monimutkainen kohde asumattomalla alueella	•	•	o	o	o	o	•
Yksinkertainen kohde asumattomalla alueella	•	o	-	-	-	-	o
Vaativat kalliomekaaniset olosuhteet	•	•	•	•	•	•	•
Helpot kalliomekaaniset olosuhteet	•	o	-	-	-	-	o

Taulukko 8. Suomen kalliorakennuskohteissa yleisimmin käytettävät kalliomekaaniset seurantamenetelmät.

Menetelmä	Käyttökohde/mitä saa selville/	Menetelmän hyödyt, ongelmat sekä luotettavuus
Kalliolaadun kartoitus	Q-luokituksen ja RG-luokituksen mukaiset parametrit	Varmistetaan, että aiemmin tutkimuksissa tehty kallion rakenteellinen tulkinta on oikea, kartoitustulos riippuu kartoittajasta (luotettavuus)
Ekstensometri-mittaukset	Kallion liikkeiden seuranta, mitataan kalliomassan muodonmuutoksia kalliotilan ympärillä, reikiin sijoitetaan myös lämpötila-antureita	Herkkiä vaurioitumaan louhinnan yhteydessä, pitkien ekstensometriekien taipuma, sivusuuntaiset liikkeet eivät näy (vain tangon suuntaiset liikkeet havaitaan), mittaustarkkuus $\pm 0,1$ mm
Inklinometri-mittaukset	Kallion liikkeiden seuranta	Mittaa rotaatiota laitteen pituusakselia vastaan kohtisuorassa suunnassa Sopii usein paremmin geoteknisiin mittauksiin
Konvergenssi-mittaukset	Kallion liikkeiden seuranta, seurataan joko louhitussa tilassa ja/tai sen ympäristössä tapahtuvia muutoksia sekä tutkitaan rakojen syntymistä ja leviämistä	Mittaustarkkuus on suhteessa mitattavan akselin pituuteen. Manuaalisissa mittauksissa ja pitkillä väleillä mittaustarkkuus on vain noin $\pm 1,0$ mm
Tarkkavaaitukset	Kallion liikkeiden seuranta, havaitaan kallion pintaan kiinnitettyjen pisteiden absoluuttiset siirtymät	Herkkiä vaurioitumaan louhinnan yhteydessä, vaaituksen tarkkuus on noin $\pm 0,5$ mm, edellyttää mittauksen lähtötietoina koordinaateiltaan ja korkeudeltaan tunnettuja kiintopisteitä.
Jännitystilamittaukset	Kallion jännitystilassa tapahtuvien muutosten seuranta	Seurantamittausmuotona jännitystilan muutoksia seurataan kallioon kairattuun reikään liimattujen venymäliuskojen avulla
Kuormituspultit	Kalliopulttien kuormituksessa tapahtuvien muutosten seuranta	Työläs asentaa pulttikohtaisesti. Voidaan asentaa joko työnaikaista tai pitkäaikaisseurantaa varten.
Painuma-seuranta	Maa- ja kallioperän liikkeiden seuranta	
Pohjavesi-seuranta	Pohjaveden pinnan korkeuden havainnointiin	Tutkimusverkoston oltava riittävän tiheä, jotta yksittäisten putkien vaurioituminen esim. injektointien seurauksena ei kaada järjestelmää. Huomioitava vuodenaikojen ja eri vuosien luonnolliset vesipinnan vaihtelut

3.6.1 Painuntaseurantaohjelma

Kohteen geotekninen suunnittelija laatii painuntaseurantaohjelman, jota kalliorakennesuunnittelija tukee kallioteknisellä osaamisellaan.

3.7 Pohjaveden hallintasuunnitelman laadinta

Kalliotilaan tulevat vuodot vaikuttavat pohjaveden pinnan korkeuteen ympäristössä. Pohjaveden korkeuden seuranta on erityisen tärkeää alueilla, joilla on puupaaluille perustettuja rakennuksia, paksuja savikerroksia tai maan kosteuspitoisuudelle herkkää kasvillisuutta. Pohjavesiputket on asennettava tarkoituksenmukaisille paikoille. Pohjaveden havaintoputket tulee asentaa maaperään, jos halutaan selvittää maaperän painuminen ja sen vaikutus esimerkiksi puupaaluille perustettuihin taloihin. Havaintoputket asennetaan kallioon, jos alueella on esimerkiksi talousvesikaivoja. Putkia asennettaessa on tärkeää, että putket ulottuvat todelliseen pohjavesikerrokseen eivätkä vain lähinnä pintaa olevaan orsivesikerrokseen.

Kalliotunnelin pohjaveden hallintasuunnitelman laatii yleensä kohteen ympäristöasiantuntijat, joille kallioteknisen suunnittelun toimesta tuotetaan tarpeellisia lähtötietoja. Pohjaveden hallintasuunnitelman laatimiseen lähtötiedoiksi tarvitaan tyypillisesti kohteen kalliooperätutkimustiedot (mm. vedenjohtavuus) ja niistä tehty kalliolaatutulkinta, kohteen louhinta-, lujitus- ja tiivistyssuunnitelmat sekä tiedot kohteen ympärillä olemassa olevista maanalaisista tiloista ja tieto kohteen ympäristön vaatimuksista. Lisäksi pitää selvittää olemassa olevien pohjaveden havaintopisteiden sijainnit ja toimivuus, jotta ne voidaan liittää osaksi seurantaverkostoa. Uudet havaintoputket palvelevat seurannan ohella myös virtausmallin kalibrointia.

Työnaikaisista pohjavesimittauksista laaditaan suunnitelma tie-/ratasuunnitelma-suunnitteluvaiheessa. Pohjaveden seuranta tehdään mittaamalla pohjaveden pinnan korkeus havaintoputkissa. Mittausten pääasiallisena tarkoituksena on ympäristön muutosten havainnointi ja mahdollisten haittojen estäminen. Pohjaveden seurantamittauksilla ohjataan tiivistystöitä ja niiden perusteella tarkennetaan tiivistystavoitteita. Pohjavesiriskialueilla mittauksilla on tarvittaessa osoitettava ulkopuolisille viranomaisille rakennustyön pohjavesivaikutukset. Pohjaveden pinnan mittaukset on syytä aloittaa useita kuukausia ennen louhinnan aloittamista. Ihanteellista olisi, jos pohjaveden pinnan mittauksia olisi tehty jo vähintään vuosi (tai enemmän) ennen rakennustöiden aloittamista, jotta saataisiin tieto vuotuisasta vaihtelusta.

3.7.1 Pohjaveden imeytyssuunnitelma

Riskialueilla on voi olla tarpeen varautua pohjaveden imeytykseen. Pohjaveden hallintasuunnitelmassa on varauduttava imeytystoimenpiteisiin, mikäli mittaukset osoittavat pohjavedenpinnan laskua tiivistystoimenpiteistä huolimatta ja laskua ei voida salliä siitä aiheutuvien haittojen ja vaurioiden johdosta. Pohjaveden imeytyssuunnitelma tulisi tehdä valmiiksi, jotta sen käyttöönotto onnistuu viipymättä, mikäli tarve sitä edellyttää.

3.7.2 Vuotovesimittaukset tunnelissa

Tunneleissa tehtävillä vuotovesimittauksilla seurataan asetettujen tiiviystavoitteiden toteutumista ja injektointityön tuloksia. Pohjaveden virtausta tunneliin voidaan mitata alueittain esim. mittapadoilla. Vuotovesien hallintaa ja tiivistyssuunnittelua on käsitelty kappaleessa 5.

3.8 Tutkimusmäärien arviointi eri suunnittelu- vaiheissa

3.8.1 Esiselvitysvaihe

Esiselvitysvaiheessa voidaan tutustua maastokäynnillä suunnittelualueeseen, mutta varsinaisia kartoituksia tai uusia tutkimuksia ei yleensä suoriteta. Esiselvitysvaiheen lopuksi voidaan ohjelmoida alueellisia kalliopinnan korkeusasemaa selvittäviä tutkimuksia tehtäväksi ennen yleissuunnitteluvaiheen alkua.

3.8.2 Yleissuunnitteluvaihe

Yleissuunnitteluvaiheen tutkimukset keskittyvät selvittämään kalliopinnan korkeusasemaa ja alustavasti kallioperän laatua. Tutkimukset voidaan suorittaa joko yhdellä kertaa tai niitä voidaan tehdä useammassa vaiheessa.

Maastokäynneillä arvioidaan paikallisesti kallioperän ominaisuuksia kalliopaljastumista ja mahdollisista olemassa olevista kalliotiloista sekä avoleikkauksista, mutta varsinaisia rakennusgeologisia kartoituksia ei yleensä vielä tässä vaiheessa tehdä.

Kalliopinnan korkeustaso selvitetään alustavasti koko tunnelilinjaukselta, pisteväli voi olla melko harva, jos kalliokattopaksuuden oletetaan olevan riittävä. Tarkemmin kalliopinta tulee selvittää tunnelien suuaukkojen ympäristöstä ja arvioitujen painanteiden alueelta. Kalliopinta tarkistetaan myös mahdollisten pysty-yhteyksien kohdalta. Kalliopinta selvitetään kalliovarmennetuin porakonekairauksin. Jos tunnelilinjalla on laajoja alueita, joista ei ole lainkaan kalliopintatietoa, voidaan käyttää geofysikaalisia menetelmiä. Geofysikaalisten mittausten tulkinna tueksi mittalinjoille sijoitetaan porakonekairauksia varmistamaan kalliopinnan sijainti.

Kallioperän laatua selvitetään kallionäytekairauksin. Kallionäytekairaukset sijoitetaan ensisijaisesti tunnelien suuaukkojen läheisyyteen sekä niin että niillä saadaan tietoa arvioituista heikkousvyöhykkeistä. Kallionäytekairauksia pyritään sijoittamaan niin, että saadaan tietoa sekä loiva- että jyrkkäasentoisista rakenteista.

Jännitystilamittausten tarve tulee harkita hankekohtaisesti. Jännitystilamittauksia tulisi suorittaa erityisesti silloin, jos suunnittelualueella on entuudestaan kalliotiloja tai jos tilalayout-suunnittelussa on erityisen haastavia ratkaisuja (esim. jänneväliä suuria tiloja pienillä kalliopilareilla).

Yleissuunnitteluvaiheen lopuksi on suositeltavaa ohjelmoida lisätutkimuksia toteutettaviksi ennen tie- tai ratasuunnitteluvaiheen alkua.

3.8.3 Tie- ja ratasuunnitteluvaihe

Tie- ja ratasuunnitteluvaiheessa tarkennetaan aiemmin suoritettuja tutkimuksia. Tutkimukset voidaan suorittaa joko yhdellä kertaa tai niitä voidaan tehdä useammassa vaiheessa. Suunnittelualueen kalliopaljastumilla, olemassa olevissa kalliotiloissa sekä avoleikkauksilla suoritetaan rakennusgeologinen kartoitus.

Porakonekairauksia suoritetaan koko tunnelilinjalla varmistamaan kalliopinnan sijainti. Pistetiheyden tulee olla suurempi kalliokaton ollessa ohut mm. tunnelien suuaukkojen ympäristössä, arvioitujen painanteiden alueella sekä mahdollisten pysty-yhteyksien kohdalla.

Kallionäytekairauksia suoritetaan antamaan lisätietoa kalliolaadusta. Kalliolaatua selvitetään erityisesti arvioitujen heikkousvyöhykkeiden kohdalla, mutta myös hyväksi oletetun kalliolaadun alueilla. Samalla suoritetaan myös jännitystilamittauksia. Tarvittaessa suoritetaan myös geofysikaalisia mittauksia kertomaan rakenteiden jatkuvuudesta.

Tie- ja ratasuunnitteluvaiheen lopuksi on suositeltavaa ohjelmoida lisätutkimuksia toteutettaviksi ennen rakennussuunnitteluvaiheen alkua.

3.8.4 Rakennussuunnitteluvaihe

Myös rakennussuunnitteluvaiheessa tarkennetaan aiemmin suoritettuja tutkimuksia. Tutkimukset voidaan suorittaa joko yhdellä kertaa tai niitä voidaan tehdä useammassa vaiheessa.

Porakonekairauksia suoritetaan tunnelilinjan niillä osilla, joista tarvitaan lisätietoa kalliopinnan korkeustasosta.

Kallioperätietoja tarkennetaan kallionäytekairauksilla sekä jännitystilamittauksilla. Joko uusista tai edellisvaiheissa otetuista kallionäytteistä suoritetaan laboratoriokokeita.

Tarvittaessa voidaan suorittaa muita tutkimuksia mm. koekuoppia ja maaperäkairauksia alueilta, joista tarvitaan lisätietoa maaperästä tai halutaan varmaa tietoa kalliopinasta.

Rakennussuunnitteluvaiheen lopuksi ohjelmoidaan kalliomekaaninen seurantaohjelma sekä pohjavesienhallintasuunnitelma.

3.8.5 Rakentamisvaihe

Rakentamisvaiheessa suoritetaan kalliomekaanisia seurantamittauksia sekä pohjaveden seurantaa. Louhintavaiheessa mittauksia suoritetaan tiheästi ja niitä voidaan harventaa, kun alueella ei enää suoriteta olosuhteita muuttavia töitä.

Louhintojen edetessä suoritetaan tunnelissa rakennusgeologisia kartoituksia.

3.8.6 Käyttö- ja kunnossapitovaihe

Tässä vaiheessa seurataan rakentamisen pitkäaikaisvaikutuksia sekä rakentamisen kallioon ja ympäristöön aiheuttamia muutoksia kalliomekaanisin seurantamittauksin sekä pohjaveden seurannalla. Mittaustiheys valitaan ottaen huomioon alueen erityispiirteet.

3.9 Kalliotutkimusten dokumentointi

- Liikenneviraston ohje pohjatutkimusten arkistointi tiehankkeissa (602/070/2011): https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf3/pohjatutkimusten_arkistointi.pdf
- Liikenneviraston ohje 10/2015 Geotekniset tutkimukset ja mittaukset.
 - o kohta 4.4.4 *Pohjatutkimusten työraportti*
"Pohjatutkimuskonsultin tulee pohjatutkimusten valmistuttua laatia kohdan 9.4 mukainen pohjatutkimustöiden työraportti ja varmistaa, että pohjatutkijan vastuulla olevien kolmansille osapuolille aiheutuneiden vahinkojen korvaus- ja muut velvoitteet on hoidettu. Pohjatutkimusten työraportti toimitetaan geo- ja kalliorakennussuunnittelijalle."
 - o kohta 4.4.6 *Tutkimustulosten toimitus ja raportointi*
"Pohjatutkimustulosten toimitusaikataulu sovitaan hankekohtaisesti ottaen huomioon hankkeen laajuus, tutkimusten lukumäärä sekä aikataulu. Tutkimustulokset toimitetaan uusimmassa Infra – pohjatutkimusformaatissa sekä täydentävät tiedot erillisinä tutkimuspistekohtaisina liitteinä (laboratoriolomakkeet, putkikortit, koekuoppakortit, ym.). Toimituserän tulokset kootaan yhteen tiedostoon tutkimusohjelmittain. Tiedostot nimitään siten, että siitä käy selville kyseessä oleva hanke, tutkimusohjelman tunniste sekä toimituserän numero."

Kalliotutkimusten tulokset voidaan koota jalostetuksi yhteenvedoksi kalliooperän rakennettavuusselvitykseen, johon tyypillisesti kootaan seuraavia asioita:

- kohteessa tehdyt kalliotutkimukset ja yhteenvedo niiden tuloksista sekä keskeisimmät johtopäätökset geologisista tulkinnoista
- kalliomekaanisissa laskenta-analyysseissä käytetyt/käytettävät kallioparametrit sekä mallinnustulokset (hankevaiheesta riippuen)
- johtopäätökset tutkimustulosten ja laskelmien perusteella
- selvitys hankkeessa käytettävistä louhinta-, lujitus- ja tiivistysmenetelmistä ja -määristä
- selvityksen lopussa otetaan kantaa jatkotutkimustarpeeseen

4 Kalliorakenteiden mitoitus

4.1 Yleistä

Kalliorakenteiden kalliotekninen mitoitus on olennainen osa kalliorakennussuunnittelua. Kalliorakenteiden kalliotekninen mitoitus koostuu tilageometrian suunnittelun edellyttämästä mitoituksesta sekä kalliomekaanisesta suunnittelusta.

Kalliorakenteen tekninen mitoitus perustuu saatuihin geologisiin tietoihin ja tilankäytöstä johtuvaan vapaan tilan tuottamiseen louhittavuuden ja rakennettavuuden näkökulmasta. Käytännössä se tarkoittaa kalliotilan sijoittelun, tilavuuksien ja muotojen suunnittelua. Kalliomekaaninen suunnittelu sisältää yleensä seuraavat viisi vaihetta (Valtanen 2002):

1. tutkimukset
2. mitoitusparametrien (kallioparametrit) määrittäminen
3. mitoituslaskenta
4. seuranta
5. jälkilaskenta.

Kalliorakenteen mitoitusta varten kalliomassasta tulee muodostaa 3-ulotteinen kuva (geologinen malli) kohteen kallio-olosuhteista. Alue on tarvittaessa jaoteltava mitoituslaskelmia varten osa-alueiksi esim. kalliolaadun, rakoilun tai layoutin perusteella.

4.2 Kalliorakenteiden mitoitusta koskevat määräykset ja ohjeet

4.2.1 Kansallinen lainsäädäntö

- Soveltuvien osin voidaan yleisesti noudattaa valtioneuvoston asetusta väestönsuojista (408/2011)
 - o 6 § ” Kalliorakenteiden kalliomekaaninen mitoitus voidaan tehdä laskennallisesti tai taulukkomitoituksena”
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110408>
- Soveltuvien osin voidaan yleisesti noudattaa Sisäasiainministeriön asetusta väestönsuojien teknisistä vaatimuksista ja väestönsuojien laitteiden kunnossapidosta (506/2011).
 - o 8 § ” Taulukkomitoituksen paksuuksista saadaan poiketa, kun laskennallisesti voidaan osoittaa kalliorakenteen kestävyys taulukkomitoitusta ohuemmilla kalliopaksuuksilla. Taulukkomitoituksessa noudatetaan kansainvälisesti hyväksyttyä Q-luokituksen määrittelytapaa kallion laatu-luokista.”
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110506>

4.2.2 Liikenneviraston ohjeet

- Ratatekniset ohjeet Rato 18 Rautatietunnelit
 - o Ottaa monin paikoin kantaa kalliorakenteiden mitoittamiseen
https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2018-19_rato18_rautatietunnelit_web.pdf
- Tietunnelin rakennetekniset ohjeet, Liikenneviraston ohje 34/2017
https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2017-34_tietunnelin_rakennetekniset_web.pdf

4.2.3 Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit

Nykyisellään eurokoodit eivät ota kantaa kalliotunnelin suunnitteluun. Eurokoodeja voidaan kuitenkin soveltaa kalliotekniseen suunnitteluun.

- Eurokoodin soveltamisohje Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2, Liikenneviraston ohje 31/2017

4.2.4 Alan yleiset tekniset ohjeet

- RIL 154-1-1987 Tunneli- ja kalliorakennus I ja RIL 154-2-1987 Tunneli- ja Kalliorakennus II
 - o käsikirjaksi laadittu oppikirjamainen teos, joka ei sisällä velvoittavia määräyksiä tai ohjeita.
- RT-ohjekortti RT 91-10655 Kalliotilat
 - o Ohjekortti käsittelee kalliotilan suunnittelun ja toteutuksen tärkeimpiä lähtökohtia. Ohjekortissa käsitellään kalliotilojen suunnittelun erityispiirteitä, rakentamisen lupamenettelyä ja tilojen kallioteknistä mitoittamista. Lisäksi ohjekortissa esitellään erilaisia kalliotiloja. Ohjekortti ei sisällä velvoittavia määräyksiä tai ohjeita
 - o Ohjekortti on vuodelta 1998 ja joiltain osin vanhentunut

4.2.5 Kaupunkien ja kuntien ohjeet

4.2.5.1 Helsinki

- Maanalaisten toimintojen yleinen turvallisuusselvitys
 - o selvitys kertoo yleisluonteisella tavalla kalliorakenteiden mitoittamisesta, mutta ei sisällä velvoittavia määräyksiä tai ohjeita
https://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/maanalainen/Maanalaisten_toimintojen_yleinen_turvallisuusselvitys.pdf
- Ohjeita energiatusselleiden päälle ja läheisyyteen rakentamisesta
 - o antaa velvoittavia ohjeita mm. holvin lujittamisesta ja putkijohtojen suojauksesta.
 - o ei ole suoraan sovellettavissa Liikenneviraston kalliotunnelin kallioteknisen mitoituksen ohjeeksi
https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Tunneliohje_Helen.pdf

- Ohjeita vesihuoltoon liittyvien kunnallisteknisten tunneleiden päälle ja läheisyyteen rakentamisesta
 - o antaa velvoittavia ohjeita mm. holvin lujittamisesta ja putkijohtojen suojauksesta
 - o ei ole suoraan sovellettavissa Liikenneviraston kalliotunnelin kallioteknisen mitoituksen ohjeeksi

https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Tunneliohje_HSY.pdf
- Helsingin kaupungin maa- ja kallioeräyksikön julkaisut 1973-2017
 - o Maa- ja kallioeräyksikkö julkaisee geo- ja kallioteknisen alan kehityshankkeista ja menetelmistä kertovia julkaisuja. Julkaisut sisältävät paljon alan teknisiä selvityksiä ja esittelyluonteisia ohjeita, mutta ei varsinaisia suunnitteluohjeita tai määräyksiä

<https://www.hel.fi/helsinki/fi/asuminen-ja-ymparisto/tontit/maa-ja-kalliopera/geotekniikka/julkaisut>

4.2.5.2 Muut kaupungit

Muita ohjeita tai suosituksia ei tässä työssä tunnistettu.

4.2.6 Pohjoismainen ohjeistus

4.2.6.1 Norja

- Statens Vegvesen: Håndbok N500 Vegtunneler
 - o Norjan tielaitoksen ohje joka määrittelee tietunnelin laatuvaatimukset
 - o kalliorakenteiden mitoitukseen liittyvät määräykset luvuissa 3 ja 6

https://www.vegvesen.no/_attachment/61913
- Statens Vegvesen: Håndbok V520 Tunnelveiledning
 - o täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla
 - o kalliorakenteiden mitoitukseen liittyvät ohjeet luvussa 6

https://www.vegvesen.no/_attachment/1597247/binary/1144089

4.2.6.2 Ruotsi

- Trafikverket: TDOK 2016:0231 Krav Tunnelbyggande
 - o määrittelee tunnelin laatuvaatimukset Ruotsin liikenneviraston tie- ja rautatiehankkeissa
 - o kalliorakenteiden mitoitukseen liittyvät määräykset luvuissa B1, C1, D1 ja E

<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=cc943b78-c6d5-4d3f-ba48-a82e45af805d>
- Trafikverket: TDOK 2016:0232 Råd Tunnelbyggande
 - o täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla

<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=1f74d32e-2394-4523-87dc-670c7f4a8f00>

 - o kalliorakenteiden mitoitukseen liittyvät ohjeet luvuissa B1, C1, D1 ja E

4.2.7 Muu ulkomainen kirjallisuus

4.2.7.1 Norja

- Norwegian Tunnelling Society
 - o Rock Support in Norwegian Tunnelling (2010, julkaisu nro 19)
 - o oppikirjamainen, norjalaiset käytännöt kokoava teos
http://tunnel.no/wp-content/uploads/2014/01/Publication_19.pdf
 - o Håndbok V224 Fjellbolting
 - o yleisteos erilaisista kalliopulteista
https://www.vegvesen.no/_attachment/69898/binary/964020
 - o Norwegian Concrete Association: Publication no. 7, Sprayed Concrete for Rock Support (Norsk Betongforenings Publikasjon nr 7 Sprøytebetong til bergsikring (2011))
 - o Norjan Betoniyhdistyksen ohje ruiskubetonista ja -betonoinnista
 - o täydentää ruiskubetonistandardeja

4.3 Kalliolaadun määrittäminen

Kallio koostuu ehjästä kivimateriaalista ja sitä leikkaavista raoista, rikkonaisuusvyöhykkeistä ja mahdollisista rapautumista. Kalliossa vaikuttaa painovoimasta ja tektonisista voimista aiheutuva jännityskenttä ja kallion raoissa vaikuttava pohjavesipaine. Kallion lujuuden selvittäminen edustavasti kokeiden avulla ei käytännössä ole tunnelikohteissa mahdollista, joten kallion ominaisuuksien määrittämiseksi käytetään kallionluokitusmenetelmiä, joista empiirisesti on johdettavissa kallion lujuusarvoja. Parhaiten suomalaiseen kallioperään soveltuvia menetelmiä ovat RQD-, Q- ja RG-luokitukset yhdessä ja erikseen.

4.3.1 ISO-maa- ja kallioluokitus

ISO on julkaissut kallion tunnistamis- ja luokitusstandardin ISO 14689-1 maa- ja vesirakentamista varten (SFS-EN ISO 14689-1). ISO-luokitus jaetaan kolmeen osaan: kallion tunnistamiseen, kalliomateriaalin kuvaukseen ja kalliomassan kuvaukseen. Suomen Geoteknillinen Yhdistys on julkaissut standardin kansallisen soveltamisohjeen: ISO-maa- ja kallioluokituksen soveltamisohje Suomessa.

Eurokoodi 1997-2 edellyttää kallion kuvaamiseen ISO 14689-1 mukaisesti. Kuitenkin eurokoodissa todetaan ”muitakin julkaistuja ja paikallisesti hyväksytyjä luokitusjärjestelmiä voidaan käyttää, mikäli raportista käy ilmi jäljitettävissä oleva viittaus”. Näin ollen käytettäessä muita kallionkuvausmenetelmiä (esim. Q tai RG) tulee raportissa mainita niiden viite.

ISO-luokitus on kalliota kuvaileva menetelmä, joka kuvailee kallion ominaisuuksia ottamatta kantaa kallion rakennustekniseen laatuun. Luokituksen avulla voidaan kuvata kallion geologiset olosuhteet kattavasti ja monipuolisesti. Menetelmästä ei saada numeerisesti täsmällisesti ilmaistavaa tulosta kallion laadusta etenkin tunnelirakentamisen näkökulmasta. ISO-luokitus on soveltuva Keski-Euroopan kallio-olosuhteisiin, mutta ISO-luokituksen hyödyntäminen Suomen kovan kallioperän olosuhteissa vaatii, että tiettyjä mittaussparametreja joko osittain tai kokonaan muutetaan tai luokkia yhdistetään keskenään.

ISO 14689-1 standardi on osana Eurokoodia 7 (EN 1997): Geotekninen suunnittelu, SFS-EN ISO 14689-1 käsittelee kalliomateriaalin ja kalliomassan tunnistamista ja kuvausta mineralogiseen koostumukseen, syntyyyn liittyviin näkökantoihin, rakenteeseen, raekokoon, epäjatkuvuuksiin ja muihin parametreihin. ISO-kallionluokitus suoritetaan kolmen vaiheen kautta, joista ensimmäinen on kallion tunnistaminen. Kallion tunnistamisella tarkoitetaan kivilajin määrittämistä. Toinen vaihe on kalliomateriaalin kuvaus, jossa kuvaillaan kalliomateriaalia käyttämällä seuraavia ominaisuuksia: väri, raekoko, perusmassa, rapautuminen, karbonaattipitoisuus, kalliomateriaalin säilyvyys ja puristuslujuus. Kolmantena vaiheena suoritetaan kalliomassan kuvaus, joka sisältää kivilajin, makrorakenteiden, epäjatkuvuuksien sekä rapautumisen arvioinnin ja mahdollisen pohjaveden vaikutukset kallion rakenteelliseen lujuuteen perustuen (Niiranen 2015).

4.3.2 Q-luokitus

Kallion Q-luokitus on rakennusgeologinen kallioluokitusmenetelmä, jolla kalliota voidaan kuvata laadullisin termein (esim. hyvä, kohtalainen, heikko). Lisäksi menetelmä antaa laatua kuvaavan numeerisen arvon logaritmisella asteikolla. Q-luokituksessa kallion laatua kuvataan kallion rakoilun, rakopintojen leikkauslujuuden ja jännitystilän perusteella, jotka määritellään erikseen kuudella erillisellä parametrilla.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (1.)$$

missä	RQD =	rakoluku,
	J _n =	rakosuuntien lukumäärätekijä,
	J _r =	rakopintojen karkeusluku,
	J _a =	rakopintojen muuttuneisuusluku,
	J _w =	rakojen vedenläpäisevyysluku ja
	SRF =	jännitystilatekijä.

Q-luokitusta käytetään mm. kalliomekaanisten laskentaohjelmien lähtöarvojen määrittämiseen, kalliorakennuskohteen alustavaan lujitus suunnitteluun ja työnaikaiseen lisälujitusten määrittämiseen. Q-luokituksella saadaan tietoa kalliomassan (ei kiven) lujuusominaisuuksista. Kalliorakennuskohteen lujitus suunnittelussa täytyy ottaa Q-luvun lisäksi huomioon yksittäisten heikkousvyöhykkeiden vaikutus.

Q-luku voidaan määrittää kallionäytekairauksen sydännäytteistä sekä kartoittamalla näkyvää kalliopintaa esimerkiksi tunnelissa, kallioleikkauksissa ja kalliojaljastumilla.

Q-luokituksen käyttöohjeet löytyvät Norjan Geoteknisen Instituutin (NGI) julkaisemasta Q-menetelmän käsikirjasta, jonka tuoreimman version voi ladata ilmaiseksi osoitteesta:

<https://www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise-A-Z/Engineering-geology-and-rock-mechanics/Q-system>.

Koska Q-luku on logaritminen, ei sitä voida käyttää suoraan kalliomekaanisissa laskentaohjelmissa. Laskentaohjelmia varten Q-luku linearisoidaan GSI-luvuksi (ks. 4.3.3).

Q-luvussa käytetty parametri RQD on myös eurokoodien mukainen parametri. Parametrin valintaa on käsitelty mm. Q-menetelmän käsikirjassa ja EC7:ssa.

Q-lukujärjestelmään kuuluu geologisen Q-parametrin lisäksi siihen pohjautuva kallion lujitusuusjärjestelmä (taulukkomitoitus), jota on käsitelty enemmän kohdassa 4.4.1.

4.3.3 GSI-luku

Hoek *et al.* (1993) esittivät GSI-luvun, joka on kallion laatua kuvaava suure. Sitä käytetään Hoek-Brown myötökriteerin parametrien määrittämiseen. Määrittäminen tehdään visuaalisesti huomioiden kalliomassan kiinteys ja rakopintojen laatu, mutta se voidaan johtaa myös Q-luvusta muunnoskaavalla ($GSI = 9 \ln Q' + 44$). GSI-arvo vaihtelee välillä 0–100 ja on Q-luvusta poiketen lineaarinen, minkä johdosta sitä käytetään kalliomekaanisissa laskentaohjelmissa. GSI-luku voidaan Q'-luvusta kaavalla (Hoek *et al.* 1993):

$$GSI = 9 \ln \left(\frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \right) + 44 = 9 \ln Q' + 44 \quad (2.)$$

Q' on Q-luku, jossa parametrit J_w ja SRF jätetään huomioimatta.

4.3.4 RG-luokitus

RG-luokitus eli rakennusgeologinen kallioluokitus on Suomessa 1970-luvulla kehitetty kalliolaatua kuvaileva luokitusjärjestelmä. Kalliolaatu määritellään kivilaadun ja rakoilun avulla. Kivilaadusta arvioidaan rapautuneisuus, osasten järjestyneisyys, raekoko ja mineraalit, rakoilusta rakoilutyyppi, rakotiheys ja rakojen laatu.

Rapautuneisuus määritellään kivilaadun ensimmäisenä luokitusominaisuutena. Kivi voi olla rapautumaton (Rp0), vähän rapautunut (Rp1), runsaasti rapautunut (Rp2) tai täysin rapautunut (Rp3). Rapautuneisuus kertoo mekaanisesti ja/tai kemiallisesti tapahtuneesta rakenteen löyhtymisestä ja mineraalien muuttumisesta. Rapautumaton kiviaines muuttuu rapautuessaan asteittain löyhäksi ja pehmeäksi mineraalimassaksi.

Osasten järjestyneisyyden mukaan kivilaatua nimitetään massamaiseksi (M), liuskeiseksi (L) tai seoksiseksi (S). Massamaisessa kivilaadussa osaset ovat jakautuneet tasaisesti eikä selvää mineraalien yhdensuuntaisuutta voi havaita, myös kivilaadun ominaisuudet ovat kaikissa suunnissa samanlaiset. Liuskeisessa kivilaadussa mineraalit ovat suuntautuneet, ja niiden liuskeisuusaste on joko kohtalainen tai voimakas. Liuskeisuusasteella kuvataan suuntautuneiden mineraalien tai muiden kivilaadun osasten suuntautuneisuuden voimakkuutta. Liuskeisuusasteita ovat suuntaukseton (0), heikko (1), kohtalainen (2) ja voimakas (3), liuskeisuusaste ilmoitetaan numerona osasten järjestyneisyyttä kuvaavan kirjaimen perässä (esim. M1 massamainen, liuskeisuusaste heikko tai L3 liuskeinen, liuskeisuusaste voimakas). Seoksinen kivilaatu koostuu kahdesta tai useammasta keskenään vaihtelevasta kivilajista, esiintymistavan perusteella seoksiset kivilaadut voidaan luokitella juomuisiksi, raitaisiksi tai murskaleisiksi.

Vallitseva raekoko määritellään silmämääräisesti tai mittaamalla. Kivilaatu on hienorakeinen, jos vallitseva raekoko on pienempi kuin 1 mm, keskirakeinen kun raekoko on 1–5 mm, karkearakeinen kun raekoko on 5–50 mm ja suurirakeinen jos raekoko on yli 50 mm.

Kivilaadulle pyritään määrittämään 2–3 päämineraalia vallitsevuusjärjestyksessä, myös muut teknisten ominaisuuksien kannalta merkitykselliset mineraalit kirjataan.

Mineraalit tunnistetaan silmämääräisesti tai yksinkertaisin apuvälinein. Päämineraalit luokitellaan seuraavasti: kvartsi, maasälvät, kiilteet, amfibolit/pyrokseenit, karbonaatit, talkki/kloriitti sekä savimineraalit. Päämineraalien määrät pyritään arvioimaan prosenttiosuuksina, tämän perusteella määritetään, onko kivilaatu pehmeä, hauras, sitkeä vai kova. Tämä kuvaus ei ota huomioon mineraalien välisten sidosten lujuutta.

Rakoilusta määritellään rakoilutyyppi, rakotiheys ja rakojen laatu. Rakoilutyyppillä tarkoitetaan rakojen geometristä esiintymistapaa, rakoilutyyppejä ovat kuutiorakoilu, laattarakoilu, kiilarakoilu ja sekarakoilu. Yksittäisiä halkeamia ei huomioida rakoilutyypeissä, vaan ne käsitellään kalliolaadun yhteydessä.

Rakotiheydellä tarkoitetaan yksittäisten rakojen keskinäistä etäisyyttä. Harvarakoisessa kalliossa rakoväli on suurempi kuin 1 metri, vähärakoisessa kalliossa 0,3–1 metri, runsasrakoisessa 0,1–0,3 metri ja tiheärakoisessa alle 0,1 metriä.

Rakoilun laatua kuvataan tiiviinä, avoimena tai täytteisenä. Tiiviiden rakojen rakopinnot ovat kiinni toisissaan, rakopinnoilla ei esiinny rapautumista eikä täytettä. Vesi ei pääse virtaamaan tiiviissä raoissa tai veden liike on erittäin vähäistä. Avoimien rakojen rakopinnot ovat irti toisistaan, eikä rakopintojen välissä esiinny täytettä. Vesi pääsee liikkumaan raoissa. Rakopinnoilla on usein havaittavissa muuttumista ja/tai ruostetta. Täytteisissä raoissa esiintyy rakopintojen välissä pehmeää ja/tai irtainta mineraalainesta. Tällaisia rakotäytteitä ovat esimerkiksi savimineraalit, karbonaatit sekä kloriitti. Täytteisiä rakoja ovat esimerkiksi haarniskaraot ja saviraot.

Kivilaadun ja rakoilun perusteella kallio jaetaan alla olevassa taulukossa (Taulukko 9) esitettyihin luokkiin.

Taulukko 9. Kalliolaadun kuvaus (Gardemaister et al. 1976)

Rakenteellinen kiinteys	Rakennetyyppi	Rakennetyyppi ja tihein rakoilu	Vallitsevien kivilaatujen kovuus/sitkeys
kiinteä	Ma massarakenteinen	Ma1 harvarakoinen	pehmeä, p hauras, h sitkeä, s kova, k
		Ma2 vähärakoinen	
		Ma3 runsarakoinen	
	Li liuskeranteinen	Li1 harvarakoinen	
		Li2 vähärakoinen	
		Li3 runsarakoinen	
	Se seosrakenteinen	Se1 harvarakoinen	
		Se2 vähärakoinen	
		Se3 runsarakoinen	
löyhä kallio	Lö löyhärakenteinen	Lö1 harvarakoinen	
		Lö2 vähärakoinen	
		Lö3 runsarakoinen	
	Ra raparakenteinen	kuvataan kivilaadun perusteella niin laajasti kuin se on rapautumisaste huomioon ottaen mahdollista	
rikkonainen kallio	Ri I halkeamarakenteinen	tasomaiset raot jakavat kallion kahteen tai useampaan erilliseen osaan	
	Ri II rakorakenteinen	runsarakoinen	ei rakotäytettä
	Ri III murrosrakenteinen	tiheärakoinen	rakojen täytteisyys vähäistä
	Ri IV ruhjerakenteinen	runsa tai tiheärakoinen	raoissa savitäytettä
	Ri V savirakenteinen	-	runsaasti kalliosavea

4.3.5 Muita kalliolaadun määritysmenetelmiä

Taulukko 10. Kalliolaadun määrittäjäjärjestelmiä.

Luokitusjärjestelmän nimi (julkaisuvuosi)	Tyypillisiä käyttökohteita	Muuta
RMR-luokitus (1973)	Kaivokset	Kovan kiven alueella käytetty lähinnä kaivosympäristössä
Terzaghin kallio-luokitus (1946)	Rautatietunnelit vuoristo-ympäristössä	Perustuu teräskaarien käyttöön lujituksessa
Laufferin luokitus (1958)		Perustuu lujittamattoman kallio-tilan pysyvyysaikaan ja aktiiviseen jänneväliin
RQD-luokitus (1967)	Perustuu vain rakoiluun	Käytetään yleisesti yhtenä kallio-parametrina, sisältyy sekä eurokoodijärjestelmään (EN 1997) että Q-lukujärjestelmään. Käytetään harvoin pelkkänä kallioluokitusjärjestelmänä
RSR-luokitus (1972)	Luokitus perustuu kallio-alueen yleiseen geologiaan, rakotietoihin sekä pohja-vesiolosuhteisiin.	Ei käytössä Suomessa.
NATM (1957...1965)	Kallio jaetaan seitsemään eri luokkaan	Ei juurikaan käytössä kovan kiven alueella.

4.4 Kalliomekaaniset mitoitusmenetelmät

Kalliomekaanisessa suunnittelussa määritetään louhittavasta tilasta kallioon aiheutuva kuormitus sekä kuormituksen huomioivat, stabiliteetin turvaamiseksi tarvittavat kalliota lujittavat rakenteet. Kalliomekaaninen suunnittelu käsittää kallion ominaisuuksien määrittelyn rakennettavuuden kannalta, suunniteltujen kalliotilojen stabiliteetin tarkastuksen laskelmin sekä suunnitelmien varmistamisen seuraamalla kallion käyttäytymistä (seurantamittaukset). Varsinaiset mitoituslaskentamenetelmät voidaan jakaa empiirisiin viitekohteisiin perustuviin menetelmiin (taulukkomitoitus), yksinkertaisiin analyttisiin tarkasteluihin ja numeerisiin menetelmiin. Menetelmät eivät ole toisiaan poissulkevia.

4.4.1 Empiirinen viitekohdemenettely (taulukkomitoitus)

Empiiriset menetelmät perustuvat aikaisempien kokemusten hyväksikäyttöön. Empiirisiä menetelmiä ovat empiiriset murtokriteerit, kallioluokitukset ja kallioluokituksiin perustuvat lujitus- ja tukirakennesuositukset.

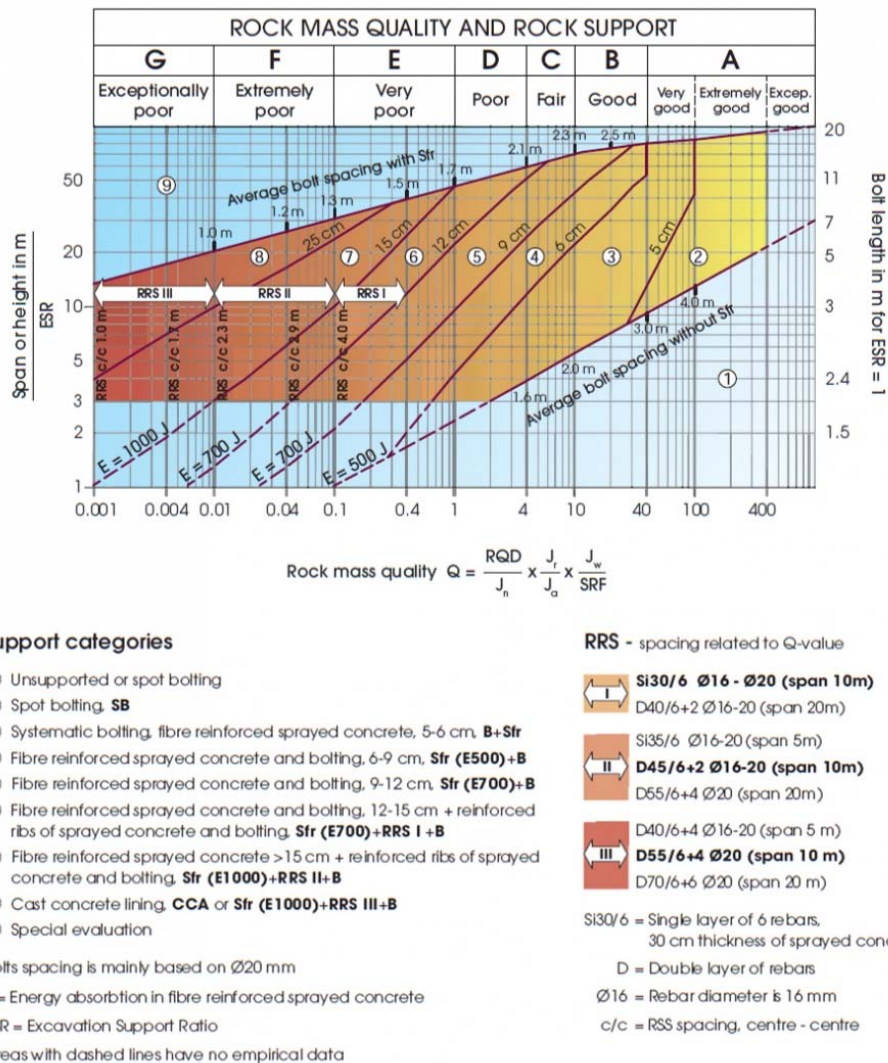
Suomessa kovan kiven alueella kalliotunneleissa käytetyin empiirinen mitoitusmenetelmä on Q-luokitukseen perustuva lujitussuositustaulukko (Kuva 8). Se on myös valtioneuvoston asetuksen 506/2011 mukaan myös kansainvälisesti hyväksytty tapa, joskin etenkin Keski-Euroopan kallio-olosuhteissa sen käyttö ei ole enää laajaa ja herättää keskustelua.

Q-lujitussuosituksen soveltamiseen tarvitaan lähtötiedoiksi kalliolaatua kuvaava Q-luku (ks. 4.3.2 Q-luokitus) sekä lujitettavan tilan dimensiot. Viimeisin viitekohteilla täydennetty lujitussuositusdiagrammi sekä sen käyttöohjeet löytyvät Norjan Geoteknisen Instituutin (NGI) julkaisemasta Q-luvun käsikirjasta, jonka tuoreimman version voi ladata ilmaiseksi osoitteesta:

<https://www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise-A-Z/Engineering-geology-and-rock-mechanics/Q-system>.

Tämän selvityksen liitteenä on esimerkkejä luokituksen soveltamisesta.

Huom. Käytettäessä Q-lujitussuositusta tulee huomioida kallio-olosuhteista johtumattomien parametrien käyttö: ESR-luku ja J_n -luvun muunnokset risteys- ja suuaukkoalueilla. Näiden soveltaminen on esitetty em. käsikirjassa.



Kuva 8. *Q-lujitusuosituksen diagrammi (NGI 2015).*

4.4.2 Analyttiset menetelmät

Analyttiset menetelmät pyrkivät selvittämään kallion käyttäytymisen teorian perusteella.

Analyttisten menetelmien haaste on se, että käytännön kalliorakentamisessa ne edellyttävät tutkittavan rakenteen merkittävää yksinkertaistamista sekä kallio-olosuhteiden että todellisten tilamuotojen osalta. Analyttiset menetelmät soveltuvatkin käytännössä vain yksittäisiin ja yksinkertaisiin tapauksiin, joita Liikenneviraston tyypillisissä kalliotunneleissa voisivat olla esimerkiksi yksittäisten lohcareiden putoamistarkastelut, mutta ei koko tunnelin stabiileittilaskelma. Käytännössä kuitenkin yksittäistä kalliolohkarettakin tarkastellaan kallioilikkeistä johtuen niin, että lohkar vapautuu ympäröivästä jännitystilasta ja pääsee liikahtamaan painovoiman seurauksena, jolloin lohcareiden lujitus perustuu suoraan painovoiman aiheuttamaan kuormitukseen. Näistä syistä johtuen analyttisten menetelmien käyttäminen käytännön kalliorakentamisen suunnittelussa on erittäin vähäistä lukuun ottamatta lohkoanalyysia.

Lohkoanalyysit perustuvat avainlohkoteoriaan (Goodman ja Shi 1985). Laskentamenetelmä on luonteeltaan analyttinen (ei-iteratiivinen). Avainlohkoteoriassa etsitään rakotietojen perusteella tilavuudeltaan suurin mahdollinen avainlohko, ellei niiden kokoa erikseen rajoiteta. Lohkojen kuormana toimii niiden oma paino.

4.4.3 Numeeriset laskennalliset menetelmät

Analyttisten menetelmien haasteena ollut rakenteiden yksinkertaistamisen edellytystä on korjattu numeerisilla menetelmillä, joiden perusteluna toimii analyttinen ratkaisu. Numeerisia menetelmiä tulee käyttää, kun empiiriset menetelmät ovat riittämättömiä ja laskentatapauksen monimutkaisuus ylittää analyttisten menetelmien käytännön mahdollisuudet. Numeeriset menetelmät antavat teoreettisesti tarkasteltuna likimääräisiä ratkaisuja, mutta ohjelmistojen ja tietokoneiden laskentatehojen kehityttyä nykyaikaisessa kalliomekaanisessa suunnittelussa numeerisen laskennan virhemarginaali on merkityksetön ja suurimmat virheet aiheutuvatkin laskentaoletuksista tai puutteellisista, virheellisistä tai huonosti kohdetta edustavista lähtötiedoista. Numeeristen menetelmien pääluokkina toimii reunaelementtimenetelmät (BEM), jatkuvat elementtimenetelmät (FDM, FEM), epäjatkuvat elementtimenetelmät (DEM) ja lohko-menetelmät. Jatkuissa menetelmissä kallio oletetaan massaksi, jossa epäjatkuvuuskohtia ei voida erikseen määritellä. Epäjatkuvassa mallissa yhdistyvät ehjän kallion ja epäjatkuvuuskohtien mallit. Jatkuvia malleja tulisikin käyttää vain tukena ensimmäisten suunnitteluvaiheiden konseptitason suunnittelussa.

Numeeriset menetelmät jaetaan käytännössä kaksi- ja kolmiulotteisiin tarkasteluihin, mutta osa käytännön sovelluksista on ns. 2,5-ulotteisia eli niissä voidaan tarkastella tilannetta kolmiulotteisesti vain yhdessä poikkileikkauksessa. Tällaisen tyypillinen sovellus on avainlohkoanalyysiohjelmistot.

Numeeriset tarkastelut voidaan lisäksi jakaa konseptuaalisiin ja realistisiin tarkasteluihin. Konseptuaalisissa tarkasteluissa ei pyritäkään rakentamaan tarkasteltavaa kalliomassaa todelliseksi (esim. rakoilu), vaan siinä huomioidaan vain aivan keskeisimmät parametrit (kalliotilan layout, kalliopinnan korkeusasema, jännitystilan suuruus ja suunta). Konseptuaalinen mallinnus perustuu jatkuviin malleihin. Realistisissa tarkasteluissa kalliomassaan mallinnetaan kalliolaatutekijät, rakoilutiedot yms. käyttäen epäjatkuvia malleja.

Liikenneviraston kalliotunneleiden kaltaisissa kohteissa on harvoin tehty dynaamista laskentaa, vaan kaikki numeeriset laskennat on tehty staattisilla malleilla, ainoastaan Tampereen Rantatunnelin itäisen suuaukon ohuen kalliokaton alueella numeerisessa laskennassa huomioitiin räjäytyksen aiheuttama dynaaminen paineisku. Kalliotunnelit tulevat kuitenkin jatkossa sijaitsemaan entistä enemmän kallion pintaosissa, jolloin ohuiden kallio kattopaksuuksien määrä tulee kasvamaan. Suositeltavaa onkin, että kalliotilan jännevälillä ollessa yli 10...15 metriä ja kallio kattopaksuuden ollessa 1/3 jännevälistä tai ohuempi tulisi räjäytyksen aikaansaama dynaaminen paineisku ainakin jottenkin huomioida numeerisessa laskennassa.

4.5 Kalliorakenteiden mitoitus eri hanke- vaiheissa

Kalliorakenteiden mitoituksen tavoitteille eri suunnitteluvaiheissa ei löydy olevassa olemassa ohjeistuksesta selkeään kokonaisuuteen pyrkivää kuvausta. Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 11) on muodostettu yleisesti eri suunnitteluvaiheiden perustavoitteiden pohjalta kalliorakenteiden mitoituksen tavoitteet sekä kuvattu menetelmät, joilla päästään onnistuneeseen lopputulokseen. Lisäksi taulukkoon on lisätty mitoituksen dokumentointitapa.

Taulukko 11. Kalliorakenteiden mitoitus eri suunnitteluvaiheissa. Taulukossa lyhenne L tarkoittaa kalliotunnelin tai -tilan jänneväliä.

Suunnitteluvaihe	Kalliorakenteiden mitoituksen tavoite	Mitoitusmenetelmä	Mitoituksen dokumentointi
Esiselvitysvaihe (hankekohtaisesti esim. kehittämisselvitys, tarveselvitys, toimenpideselvitys)	Arvio kallioresurssin käytettävyydestä	Viitekohdemenettely (empiirinen)	Osana muuta selostusta
Yleissuunnitelmavaihe	Arvio rakennuspaikan kallioteknisestä rakennettavuudesta ja yleispiirteisen layoutin kallioteknisestä varmuudesta huomioiden ympäristön rakenteet ja kallion jännitystila Kallion lujitusrakenteiden määrittely Asemoinnin ja tilageometrioiden optimointi, lujitusratkaisun toimivuuden ja kalliomekaanisten ympäristövaikutusten suuruusluokan arvioiminen Arvio pohjavedenhallinnan ratkaisusta	Empiiriset menetelmät (taulukkomitoitus) Konseptuaalinen numeerinen 2D tai 3D tarkastelu, jos - vierekkäiset kalliotilat ovat lähempänä toisiaan kuin $L/2$, - kalliokaton paksuus on alle $L/2$ tai - Avoleikkauksen etäisyys muihin kalliorakenteisiin on alle $syvyys / 2$	Osana muuta selostusta
Tie-/rata-suunnitelmavaihe	Varmuus rakennuspaikan kallioteknisestä rakennettavuudesta käytettävällä layoutilla huomioiden ympäristön rakenteet ja kallion jännitystila Kalliorakenteet mitoitettu alustavasti Kalliotekniset ympäristövaikutukset arvioitu (kalliomekaniikka, pohjavesi)	Avainlohkoanalyysi ja realistinen (epäjatkuva) numeerinen 2D- tai 3D-tarkastelu, jos: - vierekkäiset kalliotilat ovat lähempänä toisiaan kuin $L/2$, - kalliokaton paksuus on alle $L/2$ tai - avoleikkauksen etäisyys muihin kalliorakenteisiin on alle $syvyys/2$ - risteävät tunnelit risteyskenä tai lähekkäin	Erillinen laskentataraportti
Rakennus-suunnitelmavaihe	Kalliorakenteiden yksityiskohtainen mitoitus	Mitoitusmenetelmä on riippuvainen mm. kalliomassan ominaisuuksista, dimensioista, kallio kattopaksuudesta (ks. Taulukko 12).	Erillinen laskentataraportti
Rakentamisvaihe	Kalliorakenteiden yksityiskohtainen mitoitus varmistettu todellisiin kallioolosuhteisiin	Rakennussuunnitelmavaiheen mitoitusmenetelmä Seurataan kallion käyttäytymistä mittauksin ja verrataan rakennussuunnitelmavaiheessa tehtyjen mitoitusmallien ennustamaan käyttäytymiseen. Jos käyttäytyminen on merkittävästi poikkeavaa, arvioidaan poikkeamaan johtava syy ja varmistetaan suunnitellun rakenteen toimivuus poikkeamasta huolimatta päivittämällä mitoituslaskenta/malli. Yksittäiset lohkot (painovoima)	Erillinen laskentataraportti Yksittäisten lohkojen tuennoista ei erillistä laskentataraporttia.

Rakennussuunnitelmavaiheen mitoitusmenetelmä on riippuvainen vallitsevista kallioolosuhteista, olemassa olevista kalliotiloista sekä suunnitelluista tiloista. Rakennussuunnitelmavaiheen kalliomekaanisten laskentojen tuloksina tulisi saada käsitys tilan louhinnan kalliomekaanisista vaikutuksista olemassa oleviin rakenteisiin sekä suositukset lujitusrakenteista ja louhinnan vaiheistuksesta. Rakojen avaamista ja leikkaus-siirtymistä saadaan arvio vesivuotojen mahdollisuudesta sekä tarvittaessa tiivistystöiden vaiheistuksista. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 12) on esitetty mitoitusmenetelmän valinnan vähimmäisvaatimus, sillä tämän selvityksen laadinnan yhteydessä on todettu, että Liikenneviraston kohteissa tulisi edellyttää vähintään kahden eri mitoitusmenetelmän rinnakkaista käyttöä. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli alla olevan taulukon perusteella mitoitusmenetelmäksi on mainittu vain taulukkomitoitus, tulee taulukkomitoituksen rinnalla tehdä toinen tarkastelu, esimerkiksi avainlohotarkastelu.

Taulukko 12. Rakennussuunnitelmavaiheen mitoitusmenetelmän valinta. Esitetty mitoitusmenetelmä on vähimmäisvaatimus (muokattu lähteestä Ström 2018).

Kalliolaatu	Etäisyys lähimpään kalliorakenteeseen	Tilan, heikkousvyöhykkeiden ja rakoilun keskinäinen geometria	Suurin profilimitta tai syvyys	Mitoitusmenetelmä
Lähes ehjä tai vähärakoinen, ei lohkorakenteinen	>L/2 ja H/2	2D	< 20 m	Taulukkomitoitus
			> 20 m	Taulukkomitoitus ja 2D-simulointi
		3D	< 20 m	Taulukkomitoitus
			> 20 m	Taulukkomitoitus ja 3D-simulointi
	<L/2 tai <H/2	2D	< 20 m	2D-simulointi
			> 20 m	2D-simulointi
		3D	< 20 m	3D-simulointi
			> 20 m	3D-simulointi
Ainakin kaksi pääarakosuuntaa, ei rikkonaista	>L/2 ja H/2	2D	< 15 m	Taulukkomitoitus ja avainlohkoanalyysi
			> 15 m	Taulukkomitoitus ja avainlohkoanalyysi tai epäjatkua 2D-simulointi
		3D	< 15 m	Taulukkomitoitus ja avainlohkoanalyysi
			> 15 m	Taulukkomitoitus ja avainlohkoanalyysi tai epäjatkua 3D-simulointi
	<L/2 tai <H/2	2D	< 15 m	Lohkoanalyysi ja epäjatkua 2D-simulointi
			> 15 m	Lohkoanalyysi ja epäjatkua 2D-simulointi
		3D	< 15 m	Lohkoanalyysi ja epäjatkua 3D-simulointi
			> 15 m	Lohkoanalyysi ja epäjatkua 3D-simulointi
Voimakkaasti rakoillut, tiloja leikkaavia heikkousvyöhykeitä	>L/2 ja H/2	2D	< 10 m	Epäjatkua 2D- tai 3D-simulointi
			> 10 m	Epäjatkua 2D- tai 3D-simulointi
		3D	< 10 m	Epäjatkua 3D-simulointi
			> 10 m	Epäjatkua 3D-simulointi
	<L/2 tai <H/2	2D	< 10 m	Epäjatkua 2D- tai 3D-simulointi
			> 10 m	Epäjatkua 2D- tai 3D-simulointi
		3D	< 10 m	Epäjatkua 3D-simulointi
			> 10 m	Epäjatkua 3D-simulointi

4.6 Määritettävät parametrit

Kalliomekaanisten simulointien edellyttämät mitoitusparametrit ovat laskennan keskeisimpiä lähtötietoja ja niiden tulisi perustua todellisiin arvoihin. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää taulukoituja arvoja tai suunnittelijan aiempaan kokemukseen perustuvia lähtöarvoja, mutta lähtökohtaisesti suositetaan mitattuja arvoja. Kivilajien ja rakojen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet selvitetään laboratoriokokeilla (1- ja 3- aksiaalikokeet, rakoleikkauskokeet, vetolujuuskokeet).

Mitoitusmenetelmästä riippuen laskentaohjelmien lähtötietoparametrit voivat hieman poiketa toisistaan, mutta kalliomassan lähtöparametritarve on yleensä seuraava:

- kalliolaatu (GSI)
- kivilajirajat
- puristusmurtolujuus
- kimmomoduli
- tiheys
- koheesio
- kitkakerroin
- Poissonin luku
- vaaka- ja pystyjännitys
- vetolujuus
- kallion rakoiluominaisuudet
 - o kulku ja kaade
 - o pituus ja jatkuvuus
 - o rakoväli
 - o rakoavauma
 - o rakotäyte
 - o mekaaniset ominaisuudet (lujuusominaisuudet, vetolujuus, koheesio, kitkakulma sekä normaali- ja leikkausjäykkyys).

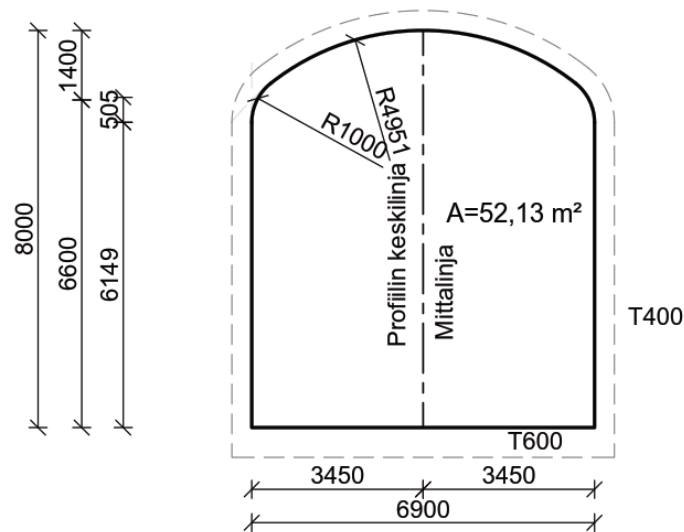
Aineen murtumiselle ei ole olemassa täydellistä teoriaa, josta syntyy tarve myötökriteereille. Kallio on hauras aine, jolle sovelletaan yleisimmin Mohr-Coulombin teoreettista murtokriteeriä sekä Hoek-Brownin empiiristä myötökriteeriä. Useat tutkijat ovat kehittäneet matemaattisia murtumakriteerejä, joiden perusteella voitaisiin ennustaa kiven lujuus eri jännitystiloissa tunnettujen materiaaliominaisuuksien perusteella. Näistä tärkeimmät ovat Coulombin, Mohrin, Griffithin sekä Griffithin muunnetut kriteerit. Näiden kriteerien perusteella kiven lujuus voidaan ennustaa silloinkin, kun kivi on usean erisuuntaisen jännityksen alaisena.

Mitoitusparametrien mittaustulosten yleistys koko laskenta-alueen kattavaksi on laskennan lopputuloksen osalta olennainen tulkinta, joka tulee tehdä erityisellä huolellisuudella. Jos kartoitettujen rakojen ominaisuudet keskiarvoistetaan ja niihin lisätään varmuuskerroin, johtaa se todennäköisesti tilanteeseen, jossa rakojen lujuusarvot eivät enää ole realistisia. Tämä voi näkyä simulointimallissa esim. siten, että mitattu jännitystila ei ”pysy” kalliossa, vaan aiheuttaa rakojen välittömän leikkautumisen joka taas purkaa jännitystilan (Ström 2018).

4.7 Louhittavien tilojen suunnittelu

Louhinnan suunnittelu keskittyy pitkälle valmiin tilan laajuuden ja laatutason suunnitteluun, mutta myös rakentamisen aiheuttamat reunaehdot tulee huomioida (lujittamattoman alueen koko, ruiskubetonin ja pultin juotoslaastin tärinänkesto). Louhintasuunnittelussa tulee huomioida holvikaaren muotoilu luonnollisen puristuskaaren aikaansaamiseksi (holvikaaren nuolikorkeus on perustapauksissa tyypillisesti $L/5 \dots L/8$, jossa L on kalliotilan jänneväli). Holvikaaren ja seinien välinen ns. pikkukaari (pyöristsykaari) ei ole kalliomekaanisesti merkittävä, mutta se tyypillisesti lisätään suunnitelmiin, koska kainalossa kiven lähtevyys vaatisi suuremman ominaispanostuksen, joka joko johtaa ryöstymiin tai suuremman ominaispanostuksen puuttuessa kovien muostumiseen.

Louhinnan suunnittelussa tulee huomioida myös viereiset kalliotilat, jotta niiden kalliomekaanisia ominaisuuksia ei häiritä uudella louhinnalla. Tyypillisesti väestönsuojasuunnittelusta tulevia reunaehtoja (esim. kalliokatto $L/2$, kuitenkin vähintään 8 m) on pidetty ”turvallisina” rajoina edetä suunnittelussa, mutta kaikki tapaukset tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti, sillä kaikki tunnelit rakennetaan uniikkeihin kallioolosuhteisiin.



Kuva 9. Esimerkki louhintapoikkileikkauksesta. Jännevälin ja holvin nuolikorkeuden suhdeluku on esimerkissä noin 5 eli $L/5$. Kuvassa teksti T400 kertoo seinien ja holvin louhinnan toleranssivaatimuksen ja T600 pohjan louhinnan toleranssivaatimuksen.

Louhintapohjan muotoilussa tulee kiinnittää huomiota pohjamuotojen yksinkertaisuuteen, sillä tunnelityössä käytettävä kalusto on varsin isomittakaavaista. Esimerkiksi keskiharjanteen jättäminen louhintapohjaan harvoin käytännössä toteutuu.

Tilojen suunnittelussa tulee huomioida kaluston rajoitus. Tunneli ei saa olla matalampi kuin holviin suunniteltu pultitus tai pultinporauksen edellyttämä porapalkin pituus. Samoin uuden tunnelin tai kuilun lähtöä ei voi suunnitella tasan samalle seinäviivalle olevan seinäviivan kanssa, sillä porakoneella ei yleensä pysty poraamaan lähempää kuin 400...500 mm kallioseiniä. Nämä reunaehdot tulee huomioida jo suunnitelmissa.

Työvaiheiden aiheuttamaa vaiheistus määräytyy kerrallaan lujittamattomana olevan tilan laajuudesta. Tätä voi tarkastella esimerkiksi avainlohkoanalyysiin avulla ja tarkastella lujittamattoman alueen laajuuden riskejä lohkokiteorian näkökulmasta. Monimutkaisissa kohteissa louhinnan vaiheistus tulee olla osana kalliomekaanisia rakennelaskelmia. Kuitenkin aina tulisi stabiliteettilaskelmissa huomioida lujittamaton osuus ja osoittaa laskelmin suurin sallittu lujittamaton ala (leveys, pituus) tai osittaisen lujituksen (esim. juottamaton ankkuripultti, pelkkä ruiskubetoni tms.) rajoitukset. Käytettäessä työnaikaisessa lujituksessa juottamattomia ankkuripultteja, tulee työnaikaisen tilanteen stabiliteettilaskelmissa huomioida pultin kapasiteetista vain sen varmistettu kapasiteetti eli toisin sanoen enintään ankkurin tartuntalujuutta tai kiristysmomenttia vastaavan vetojännityksen suuruus.

Louhinnan toleranssivaatimuksissa (tarkkuusvaatimus) sekä siihen liittyvän kallion rikkoutumisvyöhykkeen paksuuden määrittelyssä voidaan suunnittelun näkökulmasta tukeutua InfraRYLin vaatimuksiin sekä yleislouhintatoleranssin että erikoistapausten osalta.

4.8 Kallion mekaanisten lujitusrakenteiden suunnittelu

Kallion lujituksella vahvistetaan kalliota niin, että se pystyy kantamaan siihen kohdistuvat rasitukset eli kalliorakenne toimii kuormitusolosuhteissa. Kalliota lujitetaan mekaanisin lujitusrakentein, jotka muodostuvat yleisimmin kalliopulteista (harjateräs) sekä ruiskubetonoinnista. Muita menetelmiä ovat kallioverkotus sekä erilaiset teräskahat/-kaaret ja valetut tuentarakenteet. Kalliotunnelin lujitussuunnitelmien tulee aina perustua käytettyyn mitoitusmenetelmään (ks. Taulukko 11 ja Taulukko 12), jotta ei synny tilannetta jossa tunneliin määritellyn lujituksen perusteena on jotkut muut perusteet kuin tehdyt mitoituslaskelmat. Mikäli kallio-olosuhteet todetaan rakentamisen aikana mitoituksista käytetyistä poikkeaviksi, tulee mitoituslaskelmat päivittää vastaavasti.

Kallion jännitystilamuutoksista voi joskus aiheutua kalliorakenteille rasituksia, joita ei voida jäykällä kallion vahvistusrakenteilla estää. Tällöin esim. pultituksen on suunniteltava siten, että ne salliva alkuvaiheessa siirtymiä.

Lähtökohtaisesti kalliorakennesuunnittelija suunnittelee ne rakenteet, joissa kallio itsessään toimii joko sellaisenaan tai lujituksella vahvistettuna tunnelin kantavana rakenteena. Käytettäessä lujitusrakenteiden sijaan tuentarakenteita, ne yleensä suunnitellaan rakennesuunnittelijan toimesta. Näissä tapauksissa rakennesuunnittelija saa lähtötiedot kuormitusten suuruuksista (ominaisarvo), sijainneista ja suunnista kalliorakennesuunnittelijalta.

4.8.1 Pultitus

Kalliopultituksen tarkoituksena on mekaanisesti vahvistaa kalliota sitomalla kalliolohkot toisiinsa siten, että kalliomassan muodonmuutokset pysyvät sallituissa rajoissa ja kallio kestää itsenäisenä rakenteena siihen kohdistuvat kuormitukset. Kallion pultituksella ja muilla tukemistoimenpiteillä taataan, että tila on turvallinen rakentamisvaiheesta aina koko tilan käyttöänsä ajan.

Kalliopultituksen suunnittelu tehdään siten, että niiden käyttäytyminen voidaan olettaa lineaarisesti kimmoiseksi. Tällöin niiden osalta tulee tarkastella, että materiaali ei ylitä nk. kimmorajaa (σ_E), sillä jos jännitys ylittää kimmorajan jää siihen pysyvä venymä kuormituksen poistamisen jälkeen. Jännityksen ja venymän välinen yhteys voidaan esittää Hooken lain mukaan, jolla määritellään pultille suurin sallittu venymä kimmorajalle, jonka pultti saa siis vielä venyä palautuakseen jännitysten poistuttua.

Pultin staattisen toiminnan perusteella kalliopultit jaetaan jännitettyihin sekä jännittämättömiin pultteihin. Toimintaperiaatteeltaan kalliopultit jaetaan aktiivisiin ja passiivisiin pultteihin. Aktiivisilla pulteilla saavutetaan välitön lujitusvaikutus, kun passiivinen pultti tukee kalliota kallion mahdollisten muodonmuutosten alkaessa kuormittaa kalliota. Pultit on esitetty kattavasti RIL:n julkaisussa *RIL 266-2014 Kalliopultitusohje*.

Yksittäisen kalliopultin mitoitus määritellään pultin kapasiteetin ja siihen kohdistuvan rasituksen (leikkausrasitus, vetorasitus) perusteella. Pultin kapasiteetti määräytyy teräslaadun lujuuden ja pultin poikkileikkauksen pinta-alan perusteella. Tyypillisimmin käytetään harjaterästankoja B500B (SFS 1268), jonka nimellishalkaisija (\emptyset) on 25 mm tai 32 mm. Harjateräspultin B500B halkaisijan ollessa 25 mm sen ominaisvetolujuus on 245 kN ja ominaisleikkauslujuus 140 kN. Vastaavat arvot \emptyset 32 mm B500B -harjateräspultille ovat 402 kN ja 232 kN.

Käytettäessä esijännitettyjä pultteja tulee muistaa, että esijännitys pienentää pultin leikkauskapasiteettia. Tämä tulee huomioida seuraavasti:

$$\frac{\text{esijännitysvoima}}{\text{pultin vetolujuuden mitoitusarvo}} + \frac{\text{pulttiin kohdistuva leikkausrasitus}}{\text{pultin leikkauslujuuden mitoitusarvo}} < 1 \quad (3.)$$

Kalliopultin pituus tulee olla sellainen, että sille laskettu tartuntapituus ulottuu koko tartuntapituudeltaan ”terveeseen kiveen” eli joko rakoilun yli tai kalliomassaan kalliojännitysten konsentroitumisesta muodostuneeseen holvikaareen. Riittävä tartuntapituus \emptyset 25 mm harjateräspultille normaalilla kalliolaadulla on noin yksi metri ja se on laskettu eurokoodin SFS-EN 1992-1 perusteella (0,93 m). Toisin sanoen tartuntapituuden ylittäessä vaaditun arvon katkeaa pulttiteräs ennen juotoksen irtoamista, kun pulttiteräkseen kohdistetaan pulttiteräksen vetolujuuden ylittävä vetojännitys. Kalliolaadun ollessa poikkeuksellisen heikko on aina tarkasteltava erikseen kallion ja juotoslaastin tartunta toisiinsa.

Pulttipituuksien ja kapasiteettien lisäksi tulee tarkastella kalliolaatua. Kalliolaadun heikentyessä tulee pulttitiheyttä kasvattaa vastaavasti.

Pulttipituuden määrittämiseen on esitetty nyrkkisäännöksi $15 \% \cdot L + 2\text{m}$, jossa L on kalliotilan jänneväli.

4.8.2 Ruiskubetoni

Ruiskubetonin kalliota lujittava vaikutus perustuu siihen, että se tunkeutuu halkeamiin ja koloihin sekä tasoittaa epätasaisuudet parantaen näin kallion omaan holvaantumiseen perustuvaa kantokykyä:

Ruiskubetoni siis sekä *jäykistää että lujittaa kalliopintaa* (1) täyttämällä kalliorakoja ja halkeamia, jolloin lujittava vaikutus perustuu tartunta- ja leikkauslujuuteen raoissa ja halkeamissa. Lisäksi se *siirtää vaikuttavia kuormia ehjälle kalliolle* (2) tartunta- ja leikkausjännityksen avulla. Näiden lisäksi ruiskubetoni *”ottaa vastaan” taivutus- ja vetojännityksiä ruiskubetonin tartunnan ollessa heikko* (3), jolloin sen lujittava vaikutus perustuu ruiskubetonin taivutus- ja vetokapasiteettiin.

Ruiskubetonin kerrospaksuus suunnitellaan useimmiten Q-lujitussuositusten mukaisesti, mutta myös kalliomekaaniset simulointiohjelmat osaavat huomioida ruiskubetonin lujittavan vaikutuksen. Ruiskubetonikerroksen paksuuteen on esitetty myös analyyttisiä ratkaisuja, mutta huomioiden ruiskubetonin monimuotoisen toimintaperiaatteen sitä tulisi tarkastella kaikkien kolmen eri toimintaperiaatteen kautta ja valita määrävin. Analyyttisistä menetelmistä yksinkertaisimmat tarkastelevat ruiskubetonin leikkaantumista ja johtavat siihen, että ruiskubetonin paksuudella ei ole merkitystä leikkaantumiseen tietyn raja-arvon jälkeen. Muita ruiskubetonin murtumismekanismeja ovat tartunnan irtoaminen ja taivutuskapasiteetin ylittyminen. (Ks. analyyttisten ratkaisujen haasteet, kohta 4.4.2.)

Ruiskubetonin laskennallisen mitoituksen heikkous on kalliopinnan epätasaisuuden huomioinnissa, sillä valtaosa laskennoista toteutetaan teoreettiselle louhintaprofiilille, kun todellinen louhintapinta on hyvinkin epätasainen toleranssin puitteissa ja aiheuttaa ruiskubetoniin samanaikaisesti tilanteita, joissa sitä rasittaa veto-, leikkaus- ja puristusjännitykset. Tämän johdosta ruiskubetonikerroksen paksuudessa suurimmassa osassa tapauksia noudatetaan yllilujittamisen periaatetta.

Liikenneviraston kohteissa tulisi edellyttää, että kaikki holvi- ja seinäpinnat tulee ruiskubetonoida (kerrospaksuus vähintään 30 mm).

4.8.2.1 Ruiskubetonin vahvistaminen

Ruiskubetonin suurin tartuntalujuus on suunnilleen sama kuin käytetyn betonin vetolujuus, eli noin 5–10 % puristuslujuudesta alle 30 MPa:n puristuslujuuksilla. Suuremmilla lujuuksilla tartuntalujuus pysyy suunnilleen vakiona. Betonin taivutuslujuus on noin 10–15 % puristuslujuudesta. Betonin leikkauslujuus on likimäärin 2,7 kertaa betonin vetolujuus.

Ruiskubetonin kuituvahvistuksen tarkoitus on lisätä betonin taivutusvetolujuutta ja näin vähentää taivutusmurtuman mahdollisuutta. Mikäli on odotettavissa suuria muodonmuutoksia, on vahvistaminen parempi toteuttaa teräsverkoilla.

Teräskuidulla ja teräsverkolla vahvistettu ruiskubetoni peitetään tyypillisesti kuiduttomalla ruiskubetonikerroksella, jotta teräskuidut eivät aiheuta vaaratilanteita (terävyys) tai ruostu. Polymeerikuitujen osalta ongelma on lähinnä kosmeettinen, sillä kuidullinen kerroksen esteettinen olemus ei vastaa kuidutonta kerrosta ja toisaalta pinnassa olevat kuidut voivat kerätä likaa ja pölyä.

Teräsverkon päälle ruiskutettava ensimmäinen kerros ei saa sisältää kuituja, sillä kuidut ”holvaantuvat” verkon päälle ja aiheuttavat tukoksia, jotka heikentävät yhtenäisen ruiskubetonirakenteen muodostumista.

Polymeerikuitujen käyttö kalliorakentamisessa on merkittävästi kasvanut 2010-luvulla ja niistä on tehty muutama opinnäytetyön tasoinen tutkielma Suomessakin. Yleisesti puhutaan, että polymeerikuitujen osalta viruman tutkiminen ei ole riittävällä tasolla. Suomalaisten tulisi alalla seurata kansainvälisiä tutkimuksia asiasta tai osallistua itse tutkimiseen.

Kuitujen tarkoitus on siis lisätä ruiskubetonin ”sitkeyttä”. Puhdasoppisesti E-lukumenettelyllä ruiskubetonirakenteelle esitetään E-lukuvaatimus (E500, E700 tai E1000), joka tulee työmaan ennakkokokeissa saavuttaa. Tästä kokeellisesti määräytyy kuidun vähimmäismäärä juuri kyseisessä kohteessa käytetyllä suhteituksella, kalustolla ja työvoimalla. Toistaiseksi polymeerikuiduilta on todettu paremmaksi vaatia tietty minimikuitumäärä (esim. 5 kg/m³), mikä selittynee osittain riittämättömällä tutkimuksella polymeerikuitujen toimintaperiaatteesta.

Toinen näkökulma kuitujen käyttämiseen on vesitiiveys. Halkeillutkin ruiskubetonirakenne toimii lujittavana elementtinä, mutta halkeamat mahdollistavat vuotovedelle parempia yhteyksiä ruiskubetonin läpi suoraan kalliotilaan. Suurimmat riskit (mikro)-halkeilulle johtuvat ruiskubetonin kuivumiskutistumasta. Tätä on haluttu ehkäistä käyttämällä E-lukumenettelyä suurempaa kuitumäärää teräskuiduilla. Esimerkiksi teräskuiduilta on vaadittu 60 kg/m³, jolle ei ole kirjallisuudesta löydetty tutkimustietoon perustuvaa perustelua. Eräässä suuressa tunnelihankkeessa 2010-luvun taitteessa otettiin käyttöön kaava hoikkuusluvun ja kuitumäärän suhteelle. Kaavan laatija on yksi tämän selvityksen kirjoittajista, johon vedoten tässä selvityksessä voidaan todeta, että kaava ei perustu tutkimustietoon, vaan se ainoastaan linearisoidulla aiemmin käytettyyn portaittain kasvavaan kuitumäärävaatimukseen (Taulukko 13), joka taas pohjautui 1980-luvulla tehtyyn diplomityöhön. Kaava on kirjoitettu muotoon:

$$- 90 - 0,5 \times \text{hoikkuusluku} \leq \text{teräskuitujen määrä ruiskubetonimassassa (kg/m}^3) \geq 45 \text{ kg/m}^3. \text{ (Hoikkuusluku on kuidun pituuden ja paksuuden suhde.)}$$

Taulukko 13. Teräskuidun hoikkuusluvun ja ruiskubetonimassan sisältämän teräskuidun määrän välinen yhteys vanhalla portaittaisella mallilla.

Hoikkuusluku	Määrä kg/m ³
51...70	65
71...90	55
> 90	45

Vastaavaa kuivumiskutistuman hallintaa polymeerikuiduilla ei onnistuta saamaan riittävän hyvällä laadulla aikaiseksi, sillä polymeerikuitujen kimmokerroin on pieni teräseen verrattuna, että kuitu alkaa ”toimimaan” vasta, kun halkeama on jo veden tunkeutuvuuden estämisen näkökulmasta liian iso. Joissain kohteissa halkeilu on aiheuttanut myös esteettisiä vaurioita ja johtaa psykologiseen harhailmiöön yleisötiloissa. Tästä johtuen yleisötiloihin suositellaan aina kuidutonta pintakerrosta, joka ruiskutetaan vasta, kun kuitulujitettu ruiskubetonikerros on kovettunut riittävästi ja sen sisäiset kuivumisesta johtuvat muodonmuutokset ovat toteutuneet.

4.8.3 Kallioverkotukset

Kallioverkotuksia käytetään sekä ruiskubetonikerrosten välissä vahvistamassa ruiskubetonia tai kallion pinnassa ei peittävänä -lujituksena. Jälkimmäinen on varsin käytetty menetelmä avoleikkauksissa, mutta harvinaisempaa tunnelikohteissa ja sitä käytetäänkin tunneleissa yleensä esim. vain jännitystilavaurioalueella estämässä kivi-/ruiskubetonikappaleiden putoaminen.

Ruiskubetonia vahvistavan kallioverkotuksen tehtävä on sama kuin ruiskubetonikuiduilla. Kallioverkotuksilla saavutetaan suuremmat sitkeysominaisuudet kuin kuituja käyttämällä. Kallioverkotuksen kuituja heikompi ominaisuus on asentamisen hitaus (erillinen työvaihe) ja siitä johtuva aikasidonnaisten kustannusten määrän kasvu, sillä työn mekanisointiaste on matala. Tyypillisesti kallioverkon silmäkoko (#) on 100 mm tai 150 mm ja langan vetomurtolujuus hehkutuksen jälkeen on noin $\geq 300 \text{ N/mm}^2$.

4.8.4 Materiaaliominaisuudet ja säilyvyys

Ruiskubetonin ja pultituksen juotoslaastin laatuvaatimukset jaetaan ympäristöolosuhteiden mukaisesti eri luokkiin. Kalliooperän ja vuotovesien haitta-aineiden aggressiivisuus tulee tutkia (ks. 3.4.16 ja 3.5.5) ja huomioida rakenteiden säilyvyysmitoituksessa. Pääsääntöisesti säilyvyysmitoitus tehdään SFS-EN 206:n mukaan määrittämällä tarpeelliset XA-, XF-, XC- ja XS-luokkien osalta tulisi huomioida ruiskubetonin rakenteellinen huokoisuus (ks. kohta 8.4). Ruiskubetonin ja juotoslaastin osalta tulee huomioida, että ne ovat suorassa kontaktissa pohjavesiin, mutta ruiskubetoniin kohdistuu myös esimerkiksi liikennetunneleissa käyttötarkoituksesta johtuvaa ympäristörasitusta.

Kallion lujituspultituksissa pulttiteräksen käyttöikä voidaan huomioida kahdella eri tavalla: 1) hyväksymällä korroosio 2) estämällä tai hidastamalla korroosio pinnoitteilla tai materiaalivalinnoilla:

- korroosion hyväksyminen tarkoittaa ylimitoitusta ns. korroosiovarana
 - o rakenteen tulee olla toimintakuntoinen myös suunnitellun käyttöiän loppupäässä
 - o käytännössä arvioidaan teräspultin nimellishalkaisijan pienentyminen suunnitellun käyttöiän aikana korroosion vaikutuksesta ja laaditaan mitoituslaskelmat käyttäen pultin lujuutena halkaisijaltaan pienentyneen pultin lujuutta.
 - o korroosion suuruuden voi osoittaa laskelmin tai sen voi arvioida Liikenneviraston ohjeen 13/2017 (Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu – NCCI 7) liitteen 5 taulukkojen 3 ja 4 avulla.
- korroosion estäminen tai hidastaminen pinnoitteilla tarkoittaa käytännössä pulttiteräksen kuumasinkitystä, epoksimaalausta tai näiden yhdistelmää
 - o Kuumasinkityskerroksen paksuutta ja kestävyyttä voi arvioida Liikenneviraston oppaan 2/2012 kuvan 4.11 avulla
- korroosion estäminen materiaalivalinnoilla tarkoittaa käytännössä joko lasikuitupultteja tai hapon kestävästä teräksestä valmistettujen kalliopulttien käyttöä.

4.8.5 Paisuvahilaisten savien huomioiminen lujitusrakenteissa

Raon asennosta (suhteessa kalliotilaan) ja savimineraalien paksuudesta sekä paisuntapaineen aikaansaamasta paisuntavoimasta riippuen lujitussuunnittelussa tulee varautua ilmiön vaikutukseen. Suomen kalliooperässä todellisia ongelmia on havaittu vain erittäin harvoin, sillä harvoin kaikki kolme vaikuttavaa asiaa (asento, paksuus ja paisuntapaine) ovat kaikki kolme epäsuotuisia. Laajan ongelman ollessa kyseessä tulee rakenteet suunnitella esimerkiksi Helsingin kaupungin Kiinteistöviraston Geoteknisen osaston tiedotteen 75/1997 ”Paisuvat kalliosavet” luvun 4 mukaisesti (<https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu75.pdf>). Ks. myös kohta 3.4.18 .

5 Vuotovesien hallinta ja tiivistyssuunnittelu

5.1 Yleistä

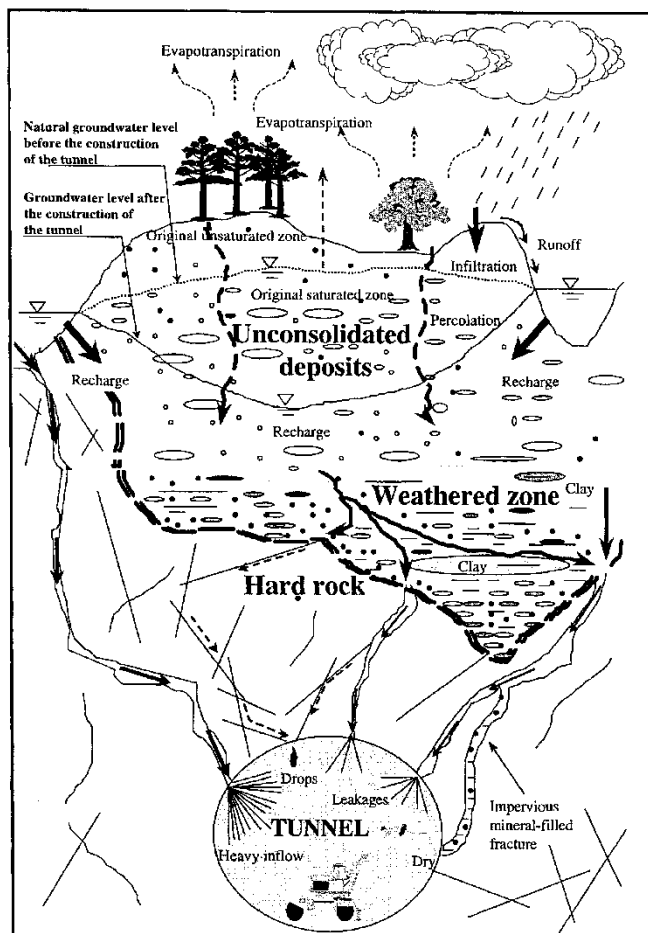
Kalliotunnelit sijaitsevat tyypillisesti pohjaveden pinnan alapuolella, jolloin tunneleihin voi kulkeutua pohjavettä kallio rakoja pitkin ja aiheuttaa siten mahdollisesti sekä haittaa tunnelissa että muutoksia tunnelin ympäristön pohjavesiolosuhteisiin. Toisaalta tietyn tyyppisissä kalliotunneleissa pohjaveden pinnankorkeuden ylläpitäminen tunnelin painetason yläpuolella on edellytys tunnelin toimintaperiaatteilla, kuten esimerkiksi kalliosäiliöissä ja jätevesitunneleissa.

Tunnelin vuotovesien hallinta käsittää ymmärryksen muodostamisen tunnelin pohjavesiolosuhteiden muutoksista ja mahdollisista seurauksista sekä pohjavesien hallinnan toimenpiteet. Toimenpiteillä pyritään pienentämään kalliotunnelin aiheuttamaa pohjaveden pinnankorkeuden alenemaa sekä estämään muutokset pohjaveden laadussa. Vuotovesien hallinnan toimenpiteet tarkoittavat yleisimmin kalliomassan tiivistämistä, mutta myös tunnelin kuivatusta ja mahdollisesti myös ympäristöolosuhteiden keinotekoisista muuttamista (imeytys). Pohjaveden mittaukset ja seuranta on esitetty luvussa 3.3 Kallion tiivistämisellä estetään vesivuotojen muodostuminen kalliotilaan, kun taas tunnelin kuivatus perustuu vesivuotojen hallintaan. Tiivistystoimenpiteet ehkäisevät pohjaveden painekorkeuden muutoksia toisin kuin kuivatustoimenpiteet.

Kaikilla kivilajeilla on erilainen ominaisvedenjohtavuus. Suomen kalliooperän kivilajien vedenjohtavuus on kuitenkin hyvin pieni, käytännössä nolla (0), joten kalliomassan vedenjohtavuus perustuu kalliomassan epäjatkuvuuskohtien (kallioraot ja rakoryhmät, heikkousvyöhykkeet) vedenjohtavuuteen. Tästä johtuen tunnelin tiivistäminen perustuu pääsääntöisesti tunnelia ympäröivän kalliomassan kalliorakojen täyttämiseen vettä läpäisemättömällä aineella, yleisimmin sementtisuspensiolla.

Tunnelin vuotovesien laatu on kalliorakentamisessa merkityksellistä materiaalisäilyvyyksien näkökulmasta. Asiaa on käsitelty enemmän luvuissa 3.5.5 ja 4.8.4.

Kallion vuotovesien hallinnalla on merkittävä rooli kalliotunnelin kalliorakentamisen rakentamiskustannuksiin. Monissa kohteissa vuotovesien hallinnan osuus kalliorakentamisen rakennuskustannuksista on arvioitu olleen jopa 20...30 %. Tämä selittyy kalliorakentamisen aikasidonnaisten kustannusten suurella osuudella ja sillä, että esijektointityön ennakointi on haastavaa ja työ estää muut rakennustoimenpiteet samassa tunneliperässä. Lisäksi louhinnan aikaansaama rakojen avautuminen voi heikentää onnistuneimmankin esi-injektoinnin tiivistysvaikutuksen ja aiheuttaa merkittäviä jälki-injektointitoimenpiteitä.



Kuva 10. Konseptuaalinen periaatekuva tunnelin vuotovesimekanismista kovan kiven alueella (Cesano 2001).

5.2 Vuotovesien hallintaa ja tiivistys-suunnittelua koskevat määräykset ja ohjeet

5.2.1 Kansallinen lainsäädäntö

- Ympäristönsuojelulaki (527/2014)
 - o pohjaveden pilaamiskielto
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527#Pidp450952368>
- Vesilaki (587/2011)
 - o Aiemmin yleisen kulku- tai valtaväylän ali rakennettava tunneli oli luvanvarainen (vesitalouslupahanke), mutta 1.1.2018 voimaan tullut muutos (611/2017) poisti tämän vaatimuksen
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110587>

- Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista (465/2014)
 - o 6 § ” **Jos on odotettavissa, että rakentaminen voi aiheuttaa haitallisia muutoksia** ympäristön luonnonolosuhteissa, maa- ja kalliopohjassa, **pohjaveden virtauksessa, pohjavedessä tai rakennusalueen tai ympäristön rakennuksissa tai rakenteissa, on rakennushankkeeseen ryhtyvän selvitettävä muutosten vaikutukset. Haitallisten vaikutusten välttämiseksi on rakentamisen sekä tarvittaessa rakennuksen käytön aikana seurattava vaikutuksia rakennushankkeeseen ryhtyvän laatiman tarkkailuohjelman mukaisesti ja rakennettava tarvittaessa tarkkailumittausjärjestelmä.**”
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140465>
- Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus (10.1.2018)
 - o 2.6 ” **Jos on odotettavissa, että rakentaminen voi aiheuttaa haitallisia muutoksia** ympäristön luonnonolosuhteissa, maa- ja kalliopohjassa, **pohjaveden virtauksessa, pohjavedessä tai rakennusalueen tai ympäristön rakennuksissa tai rakenteissa, on rakennushankkeeseen ryhtyvän selvitettävä muutosten vaikutukset. Haitallisten vaikutusten välttämiseksi on rakentamisen sekä tarvittaessa rakennuksen käytön aikana seurattava vaikutuksia rakennushankkeeseen ryhtyvän laatiman tarkkailuohjelman mukaisesti ja rakennettava tarvittaessa tarkkailumittausjärjestelmä.**”
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B687245F6-C824-413F-BB52-7A9DF0EDC210%7D/137126>

5.2.2 Liikenneviraston ohjeet

Ei suoraan kalliotunnelin suunnitteluun sovellettavia ohjeita vuotovesien hallinnan tai tiivistyssuunnittelun osalta. Yleisesti pohjaveden osalta esim.

- <https://www.liikennevirasto.fi/ymparisto/pohjavedet-maapera#.WtPFTi5uaUk>
- Pohjaveden hallinta alikulkupaikoilla, Liikenneviraston opas 1/2013
https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lop_2013-01_pohjaveden_hallinta_web.pdf

5.2.3 Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit

- SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus
 - o Liite C ohjeistaa esimerkiksi pohjavedenpaineen johtamisesta malliin ja pitkäaikaisten mittausten perusteella
 - o Eurokoodit eivät kuitenkaan sisällä kalliotunnelin tiivistyssuunnitteluun liittyviä asioita. Eurokoodi 7-2:n pohjavesien mittauksiin liittyvät asiat on esitetty seurantamittauksia käsittelevässä luvussa 3.7
- SFS-EN 12715 Pohjarakennustyöt, injektointi
 - o Standardia ei ole varsinaisesti tehty kalliotunnelin injektointiin.
 - o Standardia voi noudattaa määräite- ja käsitetasolla, mutta ei ole muutoin soveltuva kalliotunnelin injektoinnissa hyödynnettäväksi.

5.2.4 Alan yleiset tekniset ohjeet

- Kalliotilojen injektointi By53/2006
 - o Ohjeet käsittävät lähinnä kalliotilojen sementtipohjaisilla aineilla tehtävää injektointia kovassa, rakoilleessa kalliossa. Ohjeet on tehty erityisesti työmaakäyttöä silmällä pitäen, mutta sisältää myös suunnittelussa hyödynnettäviä asioita.

- InfraRYL
 - o tuorein versio kirjana julkaistu kesäkuussa 2018, nettiversio päivittyy aina tarpeen vaatiessa
 - o kallioinjektointia koskeva ohjeen sisältö on samankaltainen kuin By53/2006, mutta suppeampana ja siihen on tehty By53/2006:n julkaisun jälkeen havaittuja päivitystarpeita.

5.2.5 Kaupunkien ja kuntien ohjeet

5.2.5.1 Helsinki

- Helsingin kaupungin rakennusjärjestys
 - o 53 §: ”Rakentamista suunniteltaessa on tarvittaessa tutkittava rakentamisen vaikutukset pohjaveden laatuun, korkeusasemaan ja virtausmahdollisuuksiin”.
 - o 58 §: ”Maan alle rakennettaessa on selvitettävä riittävässä laajuudessa rakentamisen vaikutukset ympäristöön. Erityisesti on varmistuttava, ettei rakentamisella ole vaikutusta ympäristössä jo olemassa olevien maanpäällisten ja maanalaisten rakenteiden turvallisuuteen”.
- https://www.pksrava.fi/doc/yleiset/rivi_309.pdf

- Pohjavesialue
 - o Rakennustapaohje tärkeillä pohjavesialueilla rakennus- ja purkutyöhön ryhtyville edellyttää pohjaveden hallintasuunnitelman laatimista ja kuvaa sen sisällön
- https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/Pohjavesialueille_rakentaminen_liitteineen_2014.pdf

5.2.5.2 Muut kaupungit

Kaikkien isoimpien kaupunkien rakennusjärjestyksissä edellytetään pohjaveden hallintasuunnitelman laatimista, kun rakennetaan tärkeillä pohjavesialueilla.

5.2.6 Pohjoismainen ohjeistus

5.2.6.1 Norja

- Statens Vegvesen: Håndbok N500 Vegtunneler
 - o Norjan tielaitoksen ohje joka määrittelee tietunnelin laatuvaatimukset
https://www.vegvesen.no/_attachment/61913
 - o esi-injektointi käsitelty julkaisun luvussa 6.2.2
- Statens Vegvesen: Håndbok V520 Tunnelveiledning
 - o täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla
https://www.vegvesen.no/_attachment/1597247/binary/1144089
 - o esi-injektointi käsitelty julkaisun luvussa 6.4.2

5.2.6.2 Ruotsi

- Trafikverket: TDOK 2016:0231 Krav Tunnelbyggande
 - o määrittelee tunnelin laatuvaatimukset Ruotsin liikenneviraston tie- ja rautatiehankkeissa.
<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=cc943b78-c6d5-4d3f-ba48-a82e45af805d>
 - o vuotovesien hallintaan ja tiivistykseen liittyviä vaatimuksia
- Trafikverket: TDOK 2016:0232 Råd Tunnelbyggande
 - o täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla
<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=1f74d32e-2394-4523-87dc-670c7f4a8f00>
 - o vuotovesien hallintaan ja tiivistykseen liittyviä ohjeita
- Vägverket: Tätning av bergtunnlar – föutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningssatser
 - o Ruotsin tiehallinnon (nyk Trafikverket) raportti kalliotunneleiden tiivistyksestä

5.2.7 Muu ulkomainen kirjallisuus

5.2.7.1 Ruotsi

- o BeFo – Rock Engineering Research Foundation.
 - o Hydrogeology for Rock Engineers (2012, Gunnar Gustadson)
 - oppikirjamainen viimeisimmät tutkimukset ja analyttiset kaavat kokoava teos, joka kokoaa yhteen kalliotunnelin suunnittelussa tarvittavan hydrogeologian osaamisen. Kirja on julkaistu ruotsiksi ja englanniksi.
 - o Rock Grouting – Theories and Application (2015, Håkan Stille)
 - oppikirjamainen viimeisimmät tutkimukset ja analyttiset kaavat kokoava teos, joka kokoaa yhteen kovan kiven alueen injektoinnin suunnittelussa tarvittavan osaamisen. Kirja on julkaistu ruotsiksi ja englanniksi.

5.2.7.2 Norja

- o Norwegian Tunnelling Society
 - o NFFs håndbok nr. 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg (2010)
 - oppikirjamainen, norjalaiset käytännöt kokoava teos
 - o Rock Mass Grouting (2011, julkaisu nro 20)
 - oppikirjamainen, norjalaiset käytännöt kokoava teos
http://tunnel.no/wp-content/uploads/2014/01/Publication_20.pdf
 - o Publikasjon nr 104 Berginjeksjon i praksis (Klüver og Kveen 2004)

5.3 Vuotovesien hallinnan periaatteet eri hankevaiheissa

Kalliotunnelin vuotovesien hallinnan tavoitteille eri suunnitteluvaiheissa ei löydy olevassa olemassa ohjeistuksesta selkeään kokonaisuuteen pyrkivää kuvausta. Seuraavan taulukkoon (Taulukko 14) on muodostettu yleisesti eri suunnitteluvaiheiden perustavoitteiden pohjalta vuotovesien hallinnan periaatteet sekä kuvattu menetelmät, joilla päästään onnistuneeseen tavoitteeseen. Lisäksi taulukkoon on lisätty toimenpiteiden dokumentointitapa.

Taulukko 14. Vuotovesien hallinnan periaatteet eri suunnitteluvaiheissa.

Suunnitteluvaihe	Vuotovesien hallinnan tavoite	Menettelytapa / hallintatoimenpide	Hallintatoimenpiteen dokumentointi
Esiselvitys- vaihe	Pohjavesialueiden selvitys Yleispiirteinen arvio pohjaveden pinnankorkeudesta	Tukeutuminen olemassa olevaan tietoon	Osana muuta selostusta
Yleissuunnitelma- vaihe	Käsitys pohjaveden alueellisen pinnankorkeuden ja tunnelin korkeusaseman välisestä suhteesta Pohjaveden näkökulmasta riskiperusteisten rakenteiden tunnistaminen Arvio pohjavedenhallinnan ratkaisuksista	Pohjavedenpinnan korkeusmittaukset	Osana muuta selostusta
Tie-/ratasuunnitelma-vaihe	Selvitys tunnelin rakentamisen vaikutuksesta alueen pohjavedenpinnan korkeuteen (muutoksen suuruus ja vaikutusalue) sekä vaikutukset virtaussuuntien muutoksiin. Kalliotekniset ympäristövaikutukset arvioitu pohjaveden näkökulmasta Tiivistysstrategian luotu Pohjaveden seurantaohjelma luotu	Kallion vedenjohtavuuden mittaukset. Pohjavesimalli (numeerinen analyysi): - huomioidaan vähintään kyllästynyt eli jatkuvasti pohjaveden pinnan alapuolinen kerros - nykytilanne - rakentamisen aikainen alueellinen ennuste - käyttövaiheen aikainen alueellinen ennuste Suunnitelma tiivistystoimenpiteistä (esim. injektointi, membraaniratkaisu), joilla kohteen tiivistystavoitteet saavutetaan. Pohjaveden seurantaohjelman luominen (ks. 3.7), rakennuttaja voi toteuttaa järjestelmän hyvissä ajoin ennen rakennussuunnitelmavaihetta riittävän aikasarjan varmistamiseksi Maalämpö- ja porakaivoselvitykset tunnelilinjailla.	Tutkimusraportti Erillinen laskentarataportti Seurantamittaushjelmat
Rakennussuunnitelmavaihe	Tiivistystarpeen yksityiskohtainen määrittely Tiiviysluokkien määrittely Tiivistyssuunnitelmien laatiminen Ympäristönäkökulmien huomioiminen	Alueellisen tiivistystarpeen määrittely esim. Thiemin kaivoyhtälön tai Moyen kaavan avulla. Tiiviysluokkien määrittely käyttötarkoituksen ja ympäristöolosuhteiden perusteella. Kallion vuotovesien määrän pienentämiseen tähtäävien toimenpiteiden suunnittelu (esim. injektointisuunnitelmat tai membraanin asennussuunnitelmat). Pohjaveden seurantaohjelman luominen (ks. 3.7), rakennuttaja voi toteuttaa järjestelmän hyvissä ajoin ennen rakentamisvaihetta riittävän aikasarjan varmistamiseksi Alueella olevien maalämpökaivojen varoalueiden määrittely	Erillinen laskentarataportti Osaksi työselostusta Suunnitelma-asiakirjat
Rakentamis- vaihe	Tiivistyssuunnitelmien yksityiskohtainen mitoitus varmistettu todellisiin kallio-olosuhteisiin	Rakennussuunnitelmavaiheen mitoitusmenetelmä Seurataan kallion tiiviyttä mittauksin. Jos käyttäytyminen on merkittävästi poikkeavaa, arvioidaan poikkeamaan johtava syy ja varmistetaan suunnitellun rakenteen tiiviyden poikkeamasta huolimatta päivittämällä mitoituslaskenta ja suunnitelmat	Erillinen laskentarataportti Päivitetyt suunnitelmat

- Thiemin kaivoyhtälö, ks. esim. Gustafson 2012.
- Moyen kaava, ks. esim. Gustafson 2012 tai http://tupa.gtk.fi/julkaisu/ydinjate/yst_034.pdf

5.4 Ympäristöselvitykset

Pohjaveden hallintasuunnitelmaa on käsitelty kappaleessa 3.7.

5.4.1 RATO 18 vaatimukset

RATO 18 mukaan tunneleiden osalta on tehtävä seuraavat ympäristöselvitykset:

- Orsi- ja pohjavesitutkimukset:
 - o Tarveselvitys- ja alustavassa yleissuunnitteluvaiheessa sillä tarkkuudella, että vaihtoehtoisten linjausten ja tasausten vertailu voidaan suorittaa riittävällä tarkkuudella ja saadaan luotettava tieto pohjavesiolosuhteista tunnelin vaikutusalueella
 - o Alustavien tutkimusten perusteella käynnistetään orsi- ja pohjavesitilanteen pitkäaikaisseuranta, jota tarkennetaan suunnittelun edetessä
 - o Yleissuunnitteluvaiheessa vaihtoehtoisten rakenneratkaisujen teknistaloudellisten vertailujen ja ympäristövaikutusten analysoinnin sekä päätöksenteon edellyttämällä tarkkuudella ja laajuudessa
 - o Rakennussuunnitteluvaiheessa lopullisten rakenne- ja laiteratkaisujen suunnittelun sekä ympäristövaikutusten analysoinnin edellyttämällä tarkkuudella
- Orsi- ja pohjavesitutkimuksiin liittyen tehdään tunnelijärjestelmän vaikutusalueen kaivoselvitys sisältäen vesipintojen ja veden korvautuvuuden sekä veden laadulliset selvitykset kunkin suunnitteluvaiheen edellyttämällä tarkkuudella
- Kalliorakennustöiden ympäristöriskien arviointi kussakin suunnitteluvaiheessa suunnittelun ja päätöksenteon edellyttämällä tarkkuudella sekä rakennussuunnitteluvaiheessa urakalaskennan ja rakentamisen edellyttämällä tarkkuudella
- Kaikkien suunnittelualueella sijaitsevien maalämpökaivojen sijainnit
- Melu- ja värinäselvitykset (sekä rakentamisen että liikennöinnin osalta) kunkin suunnitteluvaiheen edellyttämällä tarkkuudella

5.5 Tiivistyssuunnittelu

5.5.1 Tiiviysluokat

Sekä InfraRYL että By53/2006 ovat jakaneet kalliotunnelit tiiviysluokkiin sallitun vuotovesimäärän perusteella. Tiiviysluokasta seuraa sallitun vuotovesimäärän lisäksi erinäisiä vaatimuksia toteutukselle, jotka on kuvattu ohjeessa By53/2006. Tunnelin tiiviysluokat ovat InfraRYL/2018 kohdan 15100 mukaiset tiiviysluokat on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 15).

Toteutuksen vaatimusten näkökulmasta Liikenneviraston kohteissa ei tulisi ilman perusteltua ja laskennoin osoitettua syytä käyttää tiiviysluokkia B ja C. Tunneliin sallittu pohjaveden virtaus tulee Liikenneviraston kohteissa määrittää sekä toiminnallisin perustein että laskennallisesti ympäristönäkökulmat huomioiden ja käyttää näistä tiukempaa vaatimusta. Keskimääräinen sallittu vuoto voidaan antaa tunnelin eri osiin eri suuruksina.

Taulukko 15. Tunnelin tiiviysluokat (InfraRYL/2018).

Tiiviysluokka	Sallittu pohjaveden virtaus tunneliin keskimäärin enintään	Ympäristövaatimukset	Kohde-esimerkkejä
AA	2 l/min/100-tunneli-m	erittäin vaativa	erittäin vaativat kohteet: esimerkiksi keskustarakentaminen (puupaaluperustusalueet), alueet, joissa pohjaveden pinnan laskeminen aiheuttaa ongelmia, kuten kasvillisuuden kuihtumista tai maanpinnan painumista, sekä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituspaikka
A	5 l/min/100-tunneli-m	normaali	vaativa kalliorakentaminen: kaupunkialueet yms.
B	10 l/min/100-tunneli-m	pieni	tavanomainen kalliorakentaminen: pienet vesivuodot eivät aiheuta merkittäviä ongelmia kalliotilalle eivätkä ympäristölle
C	40 l/min/100-tunneli-m	vähäinen	pyritään voimakkaiden vesivuotojen vähentämiseen; kaivokset tai vastaavat kohteet

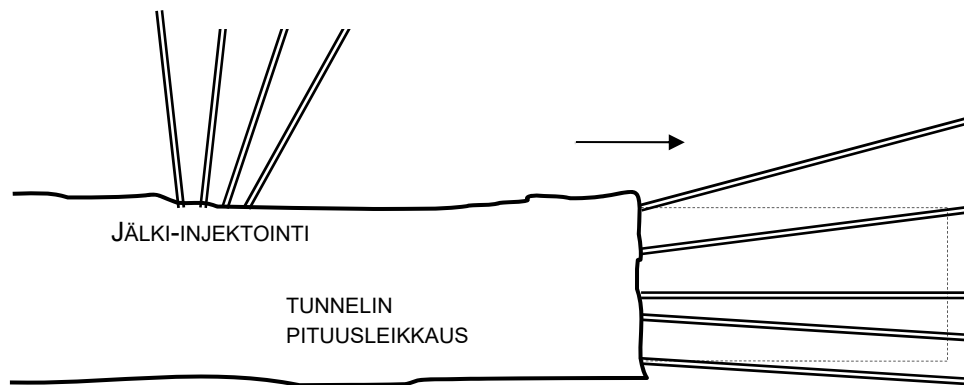
5.5.2 Tiivistysmenetelmät

5.5.2.1 Injektointi

Tyypillisin kalliotunnelin tiivistysmenetelmä on injektointi, jota voidaan tehdä esi-injektointina ennen tilan louhintaa ja jälki-injektointina tilan louhinnan jälkeen. Injektointityössä kallioon porataan injektointireikiä, joihin pumpataan paineella injektointiainetta, tyypillisimmin esi-injektoinnissa sementtipohjaisia massoja tai kolloidista silikaa ja jälki-injektoinnissa sementtipohjaisia massoja tai kemiallisia injektointiaineita.

Esi-injektoinnin periaate on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 11). Esi-injektoinnissa voidaan käyttää suurehkoja paineita, sillä paineen kalliolohkoja irti tunkkaava voima on syvällä kalliossa eikä injektointiaineella ole vapaata suoraa reittiä purkautua kalliotilaan, vaan purkautuminen tapahtuu kalliorakoja pitkin.

Jälki-injektointi eroaa esi-injektoinnista periaatteen tasolla sillä, että se toteutetaan kohteen/kohdan louhinnan jälkeen. Tällöin ei aina voida käyttää esi-injektoinnille tyypillisiä injektointipaineita, sillä injektoinnin kalliorakoja tunkkaava voima voi kohdistua lähemmäs tunnelin vapaata pintaa kuin esi-injektoinnissa. Myös injektointireikää leikkaavilla raoilla voi olla suurempi yhteys kalliotilaan. Tämän johdosta jälki-injektoinnissa käytetään usein kemiallisia injektointiaineita, joiden virtausominaisuudet ovat riittävät ja niiden kyky kovettua ja jopa paisua vettä virtaavassa pienessä tilassa ovat hyvät. Samoin kalliomassa tulee useimmissa tilanteissa suunnitella pulttitettavaksi ennen jälki-injektointia. Tietyissä tilanteissa louhimattoman kohdan esi-injektointi saattaa em. riskien perusteella muistuttaa jälki-injektointia. Tällaisia on mm. louhittuun tunneliin tehtävät risteykset ja seinäsyvennykset tai esimerkiksi holviin louhitavat kuilut. Näissä tilanteissa käytettävä injektointipaine tulee tarkastella erityisellä huolellisuudella.



Kuva 11. Esi- ja jälki-injektionnin periaate.

Jälki-injektointi on kehittynyt huomattavasti viimeisten vuosien aikana ja sitä on mahdollista tehdä myös esimerkiksi kalliopulttien kautta (jälki-injektoitava paisuntakuori-ankkuripultti). Jälki-injektionnille ei voi määrittää yksiselitteistä injektointipainetta, sillä se on aina riippuvainen kohdan kallio-olosuhteista (esim. rakoilu ja kiven oma lujuus). Nyrkkisääntönä on kuitenkin usein pidetty sitä, että jälki-injektointipaine ei saa ylittää 1 MPa:a.

5.5.2.2 Vesitiiviit rakenteet

Vesitiiviit rakenteet ovat tyypillisimmin kalliota vasten valettuja betonirakenteita tai viime aikoina yleistyneitä siveltäviä tai ruiskutettavia rakenteita (membraani). Ne kohdistetaan joko suoraan vuotaviin kohtiin tai systemaattisesti kaikille tunnelipinnoille tietyllä alueella.

Vesitiiviiden rakenteiden käyttö pohjoismaisissa kallio-olosuhteissa ei ole kovin yleistä, sillä ne eivät yleensä johda taloudellisesti edullisimpaan ratkaisuun. Tämä johtuu siitä, että ne edellyttävät pohjaveden paineen huomioimisen kallion lujitusrakenteissa, sillä vesitiiviit rakenteet tulevat kalliopinnalle tai lujitusrakenteiden päälle, jolloin vesipaine ja veden jäätymisriski tulee huomioida lujitusrakenteissa. Tämä voi johtaa korkeisiin lujituskustannuksiin. Tiivistyksen perustuessa esi-injektointiin kohdistuu vesipaine tunnelia ympäröivään kalliomassaan, jolloin vesipainetta ei yleensä tarvitse erikseen huomioida lujitusrakenteissa.

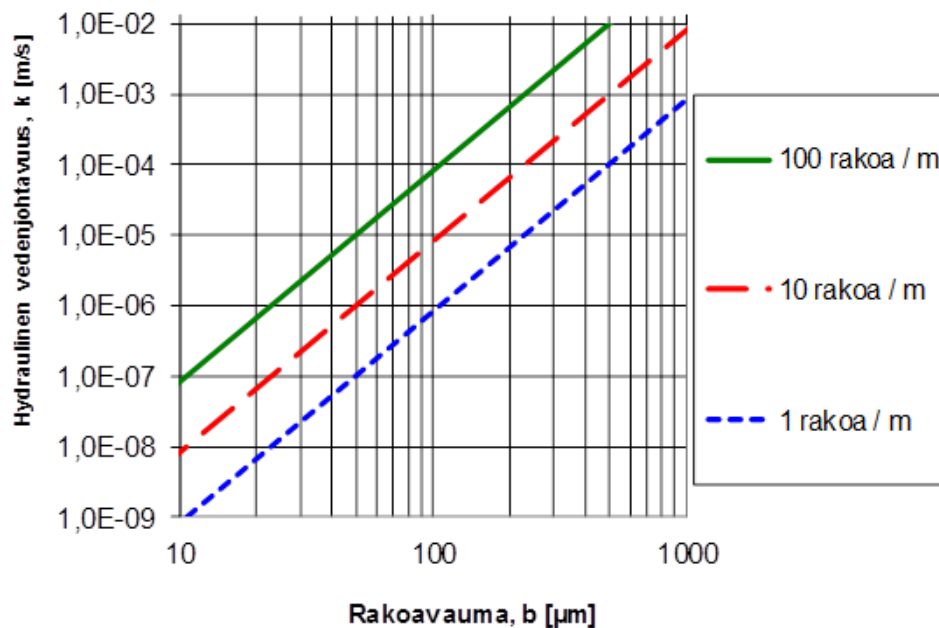
Vesitiiviitä kalliota vasten valettuja betonirakenteita ei juurikaan käytetä kalliotunneleissa, sillä vesipaineen huomioiminen johtaa varsin järeisiin rakenteisiin, joiden rakentaminen ei ole kustannustehokasta. Liikenneviraston kohteissa membraanirakenteita käytettäessä tulisi huomioida virtaavan veden jäätymisriski membraanirakenteen takana.



Kuva 12. Ruiskutettavan membraanin asennus tunnelipinnalle (Kuva: Normet Oy).

5.5.3 Injektointitarpeen arviointi

Injektointitarve on riippuvainen tiivistystarpeesta. Teoreettisesti tiivistystarve on tunnelia ympäröivän kallion *in situ* -vedenjohtavuuden ja sallitun vuotovesimäärän (ks. 5.5.1) erotus. Käytännössä injektointitarve voi olla riippuvainen joko vuotoveden määrästä tai sen potentiaalista, jolloin puhutaan kalliomassan vedenjohtavuudesta eli vedenjohtokyvystä, joka kuvaa mahdollisuutta vuotovesien kulkeutumiselle, mikäli vettä kulkee jossain vaiheessa tunnelin elinkaarta tunnelia ympäröivän kalliomassan rakoysteemeissä, vaikka rakentamishetkellä vettä ei olisikaan. Kaikilla kivilajeilla on erilainen ominaisvedenjohtavuus. Suomen kallioperän kivilajien vedenjohtavuus on kuitenkin hyvin pieni, käytännössä nolla (0), joten kalliomassan vedenjohtavuus perustuu kalliomassan epäjatkuvuuskohtien (kallioraot ja rakoryhmät, heikkousvyöhykkeet) vedenjohtavuuteen. Tätä kuvaa hyvin alla oleva, logaritmiasteikolle sovitettu kuvaaja (Kuva 13), joka on laskettu Navier-Stokesin yhtälöstä johdetun rakovirtauksen kuutiolain avulla. Edellisten johdosta kalliotunnelin injektointivuuden arvioinnissa keskitytään rakoihin ja rakojen vedenjohtokykyyn.



Kuva 13. Rakoavauman ja hydraulisen vedenjohtavuuden välinen yhteys rakoilleessa kivimassassa (muokattu lähteestä Hoek & Bray 1981).

Analyttisen, Thiemin kaivoyhtälöön perustuvan kaavan kalliotilaan kulkeutuvan veden arvioimiseksi on esittänyt alun perin Wiberg (1961). Vuosien saatossa kaava on muokkautunut kehittyen seuraavaan muotoon:

$$Q = \frac{2\pi Th}{\ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right) + \xi} \quad (4.)$$

missä:

Q	=	vuotomäärä tunneliin [m^3/s]
T	=	transmissiviteetti [m^2/s]
h	=	pohjaveden painekorkeus tunnelin keskitasolla [m]
R_t	=	tunnelin poikkipinta-alaa vastaavan ympyrän säde [m]
R_0	=	tunnelin aiheuttaman pohjaveden virtauksen vaikutussäde [m] (2xh on tyypillisesti käytetty arvio ja sitä sovelletaan vain vaakasuunnassa)
ξ	=	ns. skin-kerroin, arvo valitaan tyypillisesti väliltä 0...8 (-).

Yllä olevan kaavan skin-kerroin on eräänlainen varmuusluku, jolla (usein kokemuksellisesti) korjataan analyttisen ratkaisun ja käytännön tulosten välistä eroa ja on siten spekulatiivinen arvo. Skin-kerrointa on käsitelty laajasti esimerkiksi lähteessä Kasevnow 2006.

Vesimenekkikokeella mitataan kallioon tehtyyn reikään tunnetulla paineella suotautunutta vesimäärää määrättyssä ajassa. Mittauksella määritetään yksittäisen kalliossa olevan raon, rakoryhmän tai rajatun kallioalueen vedenjohtavuutta. Se tehdään tulpan tai tulppien rajoittamassa kairausreiän osassa. Kokeella saadaan mitattua kallion *in situ* -vedenjohtavuus. Kokeesta käytetään nimitystä Lugeon-testi ja sen tuloksen yksikkö on Lug, joka SI-yksiköillä ilmaistuna kerrannaissuureet huomioiden on $\text{dm}^3/\text{m}/\text{min}$.

$$Lug = \frac{V}{lt\Delta p} \quad (5.)$$

missä:

Lug	= Lugeon-arvo [$\text{dm}^3/\text{m}/\text{min}$]
V	= veden tilavuus [m^3]
l	= mittausalueen pituus [m]
t	= mittausaika [min], ja
Δp	= koepaineen ja pohjaveden paineen paine-ero [MPa].

Lugeon-testin ja kalliomassan vedenjohtavuuden välinen yhteys ei ole eksakti, mutta sitä on arvioitu esim. lähteessä Eriksson ja Stille (2005) seuraavasti:

$$k \approx Lug \cdot 1,6 \cdot 10^{-7} \quad (6.)$$

missä:

k	= kalliomassan hydraulinen vedenjohtavuus [m/s], ja
Lug	= Lugeon-arvo [$\text{dm}^3/\text{m}/\text{min}$].

Transmissiviteetti (T) kuvaa kykyä johtaa vettä kerroksessa. Transmissiviteetin (T) ja hydraulisen vedenjohtavuuden (k) välinen yhteys voidaan johtaa seuraavalla kaavalla (Widmann 1996):

$$T = kd \quad (7.)$$

missä:

T	= transmissiviteetti [m^2/s]
k	= kalliomassan hydraulinen vedenjohtavuus [m/s], ja
d	= kerroksen paksuus [m].

Yksittäisen raon transmissiviteetin ja hydraulisen avauman välinen suhde on riittävällä tarkkuudella ratkaistavissa rakovirtauksen kuutiolailla:

$$b_{hydr} = \sqrt[3]{\frac{12T\eta_w}{\rho_w g}} \quad (8.)$$

missä:

T	= transmissiviteetti [m^2/s]
b_{hydr}	= raon hydraulinen avauma [m]
g	= gravitaatiovakio [m/s^2]
η_w	= veden dynaaminen viskositeetti [$\text{Pa}\cdot\text{s}$], ja
ρ_w	= veden tiheys [kg/m^3].

Edellinen kaava (8.) perustuu Navier-Stokesin yhtälöön ja sen tarkka kuvaus on esitetty esimerkiksi lähteessä Eloranta (2007). Huom. Veden dynaamisen viskositeetin yksikkö on pascal-sekuntia ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

Edellä esitetyt kaavat (4)...(8) mahdollistavat analyyttiseen ratkaisuun perustuvan injektioinnin aloituskriteerin määrittämisen siten, että kriteeri kuitenkin neutraloi mittamattomissa olevia suureita ja poistaa yksittäisen raon vaikutuksen huomioiden ne summatransmissiviteettina koko tutkimusreiän pituudelta, jolloin yksittäisen raon tai heikkousvyöhykkeen välisen vedenjohtavuuden suhde ei vaikuta tulokseen (ks. liite 2).

5.5.4 Esi-injektointisuunnittelu

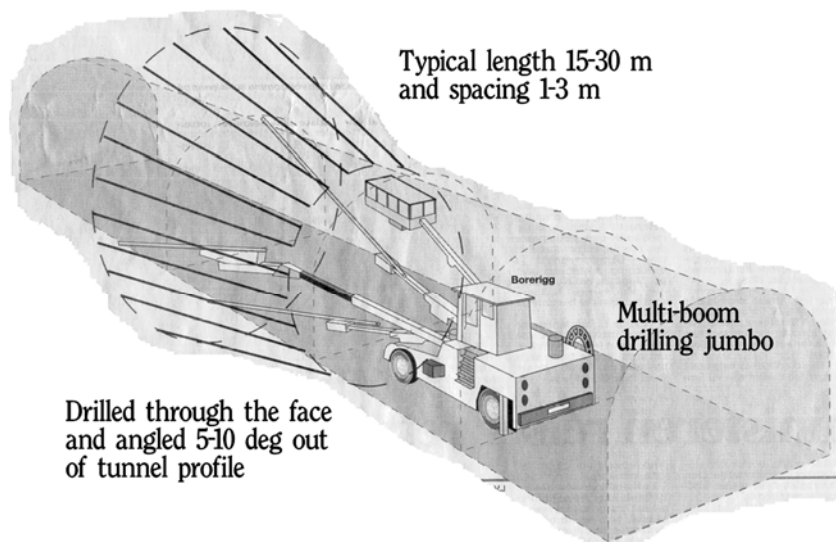
5.5.4.1 Esi-injektointiprosessin kulku

1. Injektointitarpeen määrittely
 - esim. tunnustelureikien poraus ja tunnustelurei'issä tehtävät kokeet (vesimenekkimittaus, vuotovesimittaus)
2. Päätös varsinaisesta injektoinnista
 - päätettäessä, että injektointia ei toteuteta, sementoidaan profiilin ulkopuoliset reiät esim. pulttausmassalla
3. injektointiviuhkan poraus
4. mahdolliset kokeet injektointiviuhkan rei'issä
5. injektointiaineen pumppaus paineella injektointireikiin
6. odotusaika, jolla varmistetaan injektointiaineen riittävä sitoutuminen ja kovettuminen
7. injektointityön kontrollointi ja päätös jatkotoimenpiteistä

5.5.4.2 Viuhkojen suunnittelun periaatteet

Injektointiviuhkan suunnitteluun ei ole olemassa mitään ohjeita eikä sen täydellinen systematisointi ole järkevää johtuen kalliomassan vaihteluista.

Esi-injektointiviuhkan reikien pituus on tyypillisesti vähintään 15 metriä. Pituus tulee taloudellisuuseriaa, sillä lyhyempiä reikien käyttö ei poikkeustapauksia lukuun ottamatta ole kustannustehokasta. Tyypillisesti reikäpituus rajataan 20...25 metriin, mutta myös 30 metrin reikiä on käytetty ja kuiluissa paljon pidempiä. Pitkien reikien käyttö tunnelilouhinnassa kasvattaa riskiä reikien hallitsemattomasta taipumisesta. Viuhkan limitus edellisen viuhkan kanssa on syytä olla mahdollisimman suuri, mutta yleensä minimiarvoksi rajataan n. 5 m.



Kuva 14. Esi-injektointiviuhka (MBT 2001).

Reikien suuntaus on yleensä sellainen, että reikien päät sijaitsevat 5...8 metrin etäisyydellä teoreettisesta tunnelin louhintaprofiilista. Tällä varmistetaan kalliorakojen tiivistäminen injektointimassalla riittävän kaukaa tunneliprofiilista, jotta esimerkiksi louhinnan jälkeen asennettavat lujituspultit eivät kalliorakoa lävistäessään aiheuta vuotovedelle suoria yhteyksiä kalliotilaan tai tiivistämättömiin rakoihin.

Reikäväli tunneliperässä on tyypillisesti luokkaa 1...2 metriä. Liian tiheän rei'ityksen käyttö edesauttaa reiän injektoinnin yhteydessä massavuotoja vielä injektointimattiin reikiin.

5.5.4.3 Injektointimassan virtaus kallioraossa

5.5.4.3.1 Sementtipohjaiset injektointimassat

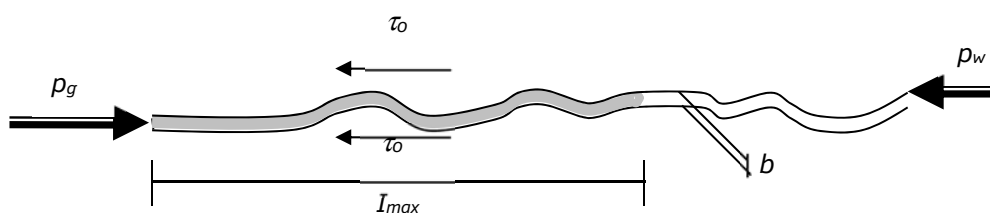
Sementtipohjaiset injektointimassat ovat ei-newtonilaisia fluideja eli Bingham-Plastisia nesteitä. Bingham-Plastinen neste käyttäytyy kuin newtoninen neste, mutta sen liikkeellelähtö vaatii nesteen myötörajaa suuremman liikuttavan voiman.

Sementtipohjaisen injektointimassan virtauspituus kallioraossa on riippuvainen injektointimassan myötörajasta, kallioraon hydraulisesta avaumasta sekä massaa liikuttavasta voimasta pohjaveden paine huomioiden (ks. Kuva 15). Edellisten perusteella voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälö hetkellä $t=\infty$:

$$2\tau_0 I = (p_g - p_w) b_{hydr} \quad (9.)$$

missä:

p_w	= pohjaveden paine [Pa]
p_g	= injektointipaine [Pa]
b_{hydr}	= kallioraon hydraulinen avaus [m]
I	= injektointimassan radiaalinen tunkeumapituus [m]



Kuva 15. Injektointimassan virtaus kallioraossa (Gustafson et al. 2006).

Tasapainoyhtälöstä voidaan ratkaista injektointimassan tunkeuman teoreettinen maksimipituus ajanhetkellä $t=\infty$ (Lombardi 1985):

$$I_{max} = \frac{(p_g - p_w) b_{hydr}}{2\tau_0} \quad (10.)$$

Taulukko 16. Kallioraon injektoinnin "suunnitteluparametrien" keskinäinen vaikutus toisiinsa, täydennetty lähteistä Gustafsson ja Stille (2005) sekä Hollmén (2007).

	Rakomäärä	Teoreettinen rakoavauma	Pohjavedenpaine	Injektointipaine	Injektointilaastin reologia		Injektointilaastin virtausnopeus
					Dynaaminen viskositeetti	Myötöraja	
Referenssi	n_{rako}	b	p_w	p_g	μ_g	\boxtimes_o	Q
Injektointipaineen kaksinkertaistuminen	n_{rako}	b	p_w	$2 p_g$	μ_g	\boxtimes_o	$\approx 3,5 Q$
Pohjavedenpaineen puoliintuminen	n_{rako}	b	$2 p_w$	p_g	μ_g	\boxtimes_o	$\approx 3,5 Q$
Viskositeetin puoliintuminen	n_{rako}	b	p_w	p_g	$0,5 \mu_g$	\boxtimes_o	$2 Q$
Myötörajan kaksinkertaistuminen	n_{rako}	b	p_w	p_g	μ_g	$2 \boxtimes_o$	$\approx 0,7 Q$
Teoreettisen rakoavauman puoliintuminen	n_{rako}	$0,5 b$	p_w	p_g	μ_g	\boxtimes_o	$< 0,5 Q$
Rakomäärän kaksinkertaistuminen	$2 n_{rako}$	b	p_w	p_g	μ_g	\boxtimes_o	$> 2 Q$

5.5.4.3.2 Kolloidinen silika

Kolloidisen silikan viskositeetti on n. viisinkertainen veteen nähden, mutta käytännössä silti mitättömän pieni (noin 5 mPa•s). Kolloidisen silikan virtausmalliin perustuva silikamassan teoreettinen maksimipituus kallioraossa on esitetty seuraavasti (Gustafson ja Funehag 2008a ja 2008b):

$$I_{\max(2D)} = 0,45 b_{hydr} \sqrt{\frac{(p_g - p_w) t_G}{6 \mu_o}} \quad (11.)$$

missä:

- p_w = pohjaveden paine [Pa]
- p_g = injektointipaine [Pa]
- b_{hydr} = kallioraon hydraulinen avauma [m]
- t_G = geeliytymisen ominaisaika [s] (=1/3 x geeliytymisaika)
- μ_o = kolloidisen silikan dynaaminen viskositeetti [Pa•s]

5.5.4.3.3 Kemialliset injektointiaineet

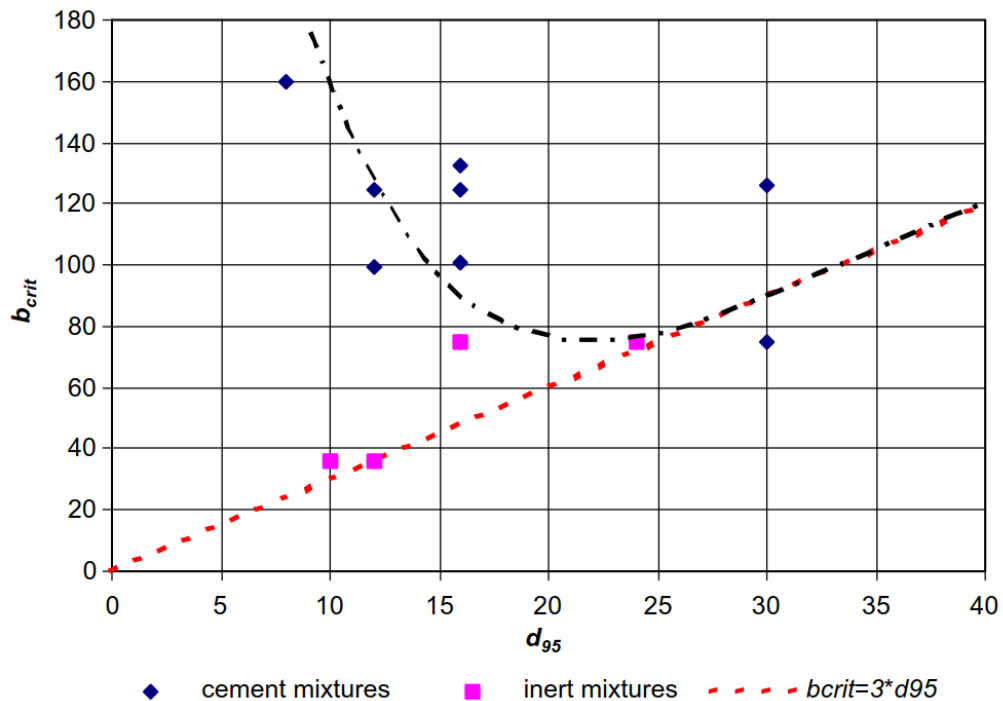
Muut Suomessa käytetyt kemialliset injektointiaineet (esim. uretaanipohjaiset) perustuvat nopeaan reagointiin, jolloin niitä käytetään yksittäisten vuotojen tiivistämisessä jälki-injektointina. Niissä olennaista ei ole nesteen merkittävä virtaus kallioraossa, vaan tiivistysaine tuodaan hyvin lähelle vuotokohtaa esim. käsiporakoneen avulla.

5.5.4.4 Materiaalivalinnat

5.5.4.4.1 Sementtimassan valinta

Kallion tiivistysinjektointiin käytettävään sementtiin ei toistaiseksi ole CE-hyväksyntää.

Käytettävän sementtityypin raekokojakauma d_{95} on tyypillisesti 16...20 μm . Tätä suurempien jakaumien käyttö (esim. rapid-sementti) tulee kyseeseen erittäin suurien vesivuotojen tiivistystöissä. Vastaavasti raekokojakaumaltaan pienempien kuin 16 μm käyttö johtaa tunkeuman pientymiseen.



Kuva 16. Raekoon (d_{95}) ja kriittisen rakoavauman (b_{crit}) välinen yhteys (Eklund ja Stille 2007). Kuvassa akseleiden lukuarvojen yksikkö on μm .

Injektointisementin raekoko ja rakoavauman yhteys on Eklundin (2005) mukaan tyypillisesti seuraava:

$$d_{95} = \frac{b}{4 \dots 10} \quad (12.)$$

Varsinaisen sementtimassan valmistamisessa tulee huomioida massan tunkeutumiskyky, riittävän suuri myötöraja sekä valmiin massan ”avoin aika” eli aika, jolloin massa on työstettävissä.

Injektointilaastin riittävä vähimmäistunkeuma raossa varmistettiin valitsemalla injektointilaasti seuraavasti (Hollmén et al. 2007):

$$\tau_0 < \frac{b(p_g - p_w)}{2I} \quad (13.)$$

Riski injektointimassan virtauksesta raossa pohjaveden vaikutuksesta estettiin huomioidamalla injektointilaastin valinnassa myös seuraava yhtälö (Axelsson 2006b):

$$\tau_0 \geq \frac{bp_w}{2l} \quad (14.)$$

5.5.4.4.2 Kolloidinen silika

Kolloidinen silika (silika sooli) on erittäin pienten kalliorakojen täytteeksi sopiva injektointiaine. Sen dynaaminen viskositeetti on pieni ennen geeliytymisaikaa. Kolloidisen silikan kiihdytinaineena toimii suola, minkä vaikutukset tulee ymmärtää pohjaveden sisältäessä suoloja.

Sillä on saatu aikaan hyviä tiivistystuloksia suhteellisen tiiviissä kalliossa, jossa kalliorakojen hydraulinen avauma on väliltä 10...100 µm.

Kolloidista silikaa on Suomessa käytetty kokeiluluonteisesti E18 Karnaisten tunnelin jälki-injektoinnissa. Varsinaisen tuotantokäytön kokemukset Suomessa ovat kevään 2018 tilanteessa lähinnä Posiva Oy:n Eurajoen ydinjätteen loppusijoituslaitoksessa esi-injektoinnissa sekä Tampereen Rantaväylän Rantatunnelin jälki-injektointityöstä.

Kolloidisen silikan käyttöä vähentää huomattavasti korkeammat materiaalikustannukset sementtipohjaisiin injektointimassoihin nähden sekä hieman erilaiset kalustovaatimukset.

5.5.4.4.3 Kemialliset jälki-injektointiaineet

Kemialliset jälki-injektointiaineet ovat tyypillisimmin kaksikomponenttisia aineita, mutta myös yksikomponenttisia aineita on markkinoilla. Useimpien kemiallisten jälki-injektointiaineiden teho perustuu sen paisuttavaan vaikutukseen, jolloin vuotokohdassa ollessaan se paisumalla täyttää veden virtauksen edellyttämän tilan.

5.5.4.4.4 Ennakkokokeet

Injektointimateriaalien ennakkokokeet on ohjeistettu kattavasti By53/2006. Ennakkokokeiden tarkoitus on määrittää muutamalle virtausominaisuuksiltaan erilaiselle injektointimassaseokselle sen mitoitusparametrit eli myötöraja ja viskositeetti, jotka saadaan parhaiten mitattua rheometrillä. Em. arvoja suunnittelija käyttää injektointisuunnittelussa. Lisäksi ennakkokokeissa mitataan massan ominaisuuksia kenttämittauslaitteilla (tiheys, Marsh-viskositeetti, suodatinpumppu), jotta varsinaisessa tuotantotyössä voidaan varmistua massan vastaavan ennakkokokeita (tiheys ja Marsh-viskositeetti), jotta suunnittelijan mitoitusparametrit pitävät tältä osin paikkaansa. Suodatinpumpukokeen tarkoitus työn aikaisissa laadunvarmistuskokeissa on varmistua sementin kelvollisuudesta (esim. kostuneessa sementissä sementtipartikkelit voivat ”liimautua” toisiinsa haitaten tunkeutumista, mikä voidaan havaita suodatinpumpulla mutta ei välttämättä visuaalisesti).

5.5.4.5 Esi-injektoinnin aloituskriteerin määrittäminen

Injektoinnin aloituskriteeri tarkoittaa määrittelyä sille, milloin kohteen rakentamisessa aloitetaan injektointi. Aloituskriteeri määritellään yleisimmin jollain seuraavista tavoista:

- ei erityistä määrittelyä, vaan kaikki viuhkat injektoidaan
- vesimenekikokeen tuloksena saatavalle Lugeon-arvolle määritetään raja-arvo ja varsinaiseen injektointityöhön ryhdytään, mikäli mitattu vesimenekiarvo ylittää raja-arvon
- mitataan tunnustelurei'istä valuvan vuotoveden määrää.

Systemaattinen kaikkien viuhkojen injektointi ei ole taloudellinen vaihtoehto, mutta pienentää riskiä siitä, että tunnustelureiät eivät kuvaa riittävästi koko tunnelia ympäröivää kalliomassaa.

Pelkkää vuotovesimittausta ei suositella, sillä välttämättä mittaushetkellä kalliossa ei ole vettä, joka vuotaisi, vaikka kalliossa on vedenjohtokykyä. Tällöin kallio voi alkaa helposti vuotamaan myöhemmin.

Vesimenekikokeeseen määritelty raja-arvo on nykyaikaisin tapa asettaa injektoinnin aloituskriteeriksi. Raja-arvon määrittelyä tulisi lähestyä analyyttisillä tarkasteluilla, jotka voi tehdä joko Moyen kaavan tai Thiemin kaivoyhtälön avulla. Thiemin kaivoyhtälöön perustuva esimerkkilasku on esitetty liitteessä 2.

5.5.4.6 Paineen määrittely

Pintakalliossa (syvyys n. < 50m) injektointipaine kannattaa valita mahdollisimman suureksi tunkeutuvuuden varmistamiseksi. Injektointipaine ei kuitenkaan saa ylittää raon normaalijännitystä, jotta kalliota ei tarpeettomasti rikota. Toisaalta injektointipaineen alarajaksi on suositeltu lähteessä Gustafson ja Stille (1996) 2 x pohjaveden paine. Edellinen ja Gustafson et al. 2007 huomioiden injektointipaine (p) tulisi valita seuraavasti:

$$2p_w < p_g \quad (15.)$$

$$\sigma_v \cdot \pi I^2 \geq \left(\frac{p_g - p_w}{3} + p_w \right) \cdot \pi I^2 \quad (16.)$$

missä:

p_w	= pohjaveden paine [Pa]
p_g	= injektointipaine [Pa]
σ_v	= kalliomassan pystyjännitys [Pa]
I	= injektointimassan radiaalinen tunkeumapituus [m]

Pystyjännitys σ_v voidaan olettaa kalliomassan painon suuruudeksi ($\sigma_v \approx \gamma \cdot gH$), jolloin kaavan (16) tasapainoyhtälöstä voidaan ratkaista injektointipaine ja kirjoittaa sen kaavaksi:

$$p_g \leq 3\gamma gH - 2 p_w \quad (17.)$$

Em. kaava ei huomioi kallion omaa lujuutta. Lisäksi ohuen kalliokattopaksuuden alueella tulisi pystyjännityksessä erikseen huomioida kallion päällä olevat mahdolliset maakerrokset tai vesistö yläpuolisen aineen tiheyden muutoksena.

Injektointipaineen osalta vallitsee kolme erilaista kulttuuria:

1. injektointipainetta nostetaan pikkuhiljaa kohti määritettyä maksimipainetta. Paineen noston vaikutuksia massan virtausnopeuteen tarkkaillaan jatkuvasti ja verrataan aiempiin kokemuksiin.
2. injektointipaine nostetaan hallitusti ja melko nopeahkosti kohti määritettyä maksimipainetta, jotta mitoituspainetta käytettäisiin mahdollisimman paljon.
3. injektointipaine nostetaan heti kohti määritettyä maksimipainetta, jotta mitoituspainetta käytettäisiin mahdollisimman paljon.

5.5.4.7 Lopetuskriteerit

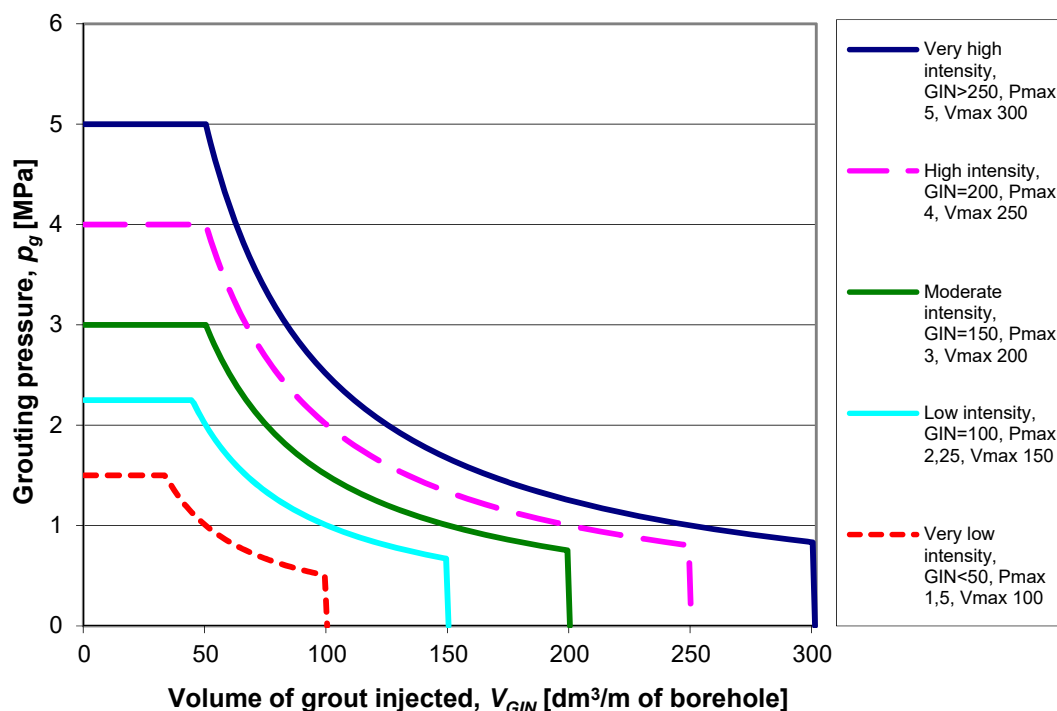
Injektoinnin lopetuskriteeri (grouting stop criterion) tarkoittaa ennalta määriteltyä tapahtumaa tai aikaa, jolloin yksittäisen reiän injektointi osataan lopettaa. Osa kallioinjektioinneissa käytetyistä lopetuskriteereistä on osana isompaa teoreettista ajatusta. Lopetuskriteereitä on muutamia erilaisia.

GIN-menetelmä (Grouting Intensity Number)

GIN-menetelmä on esitelty alun perin Lombardin ja Deeren toimesta vuonna 1993.

GIN-menetelmässä lopetuskriteerinä toimii joko pumpattavan massan menekille määritetty maksimimäärä (v_{\max}), injektointipaineelle määritetty maksimimäärä (p_{\max}) tai ns. GIN-luku, joka pyrkii kuvaamaan injektointimassan kalliorakoon siirtämää energiaa ja on erikseen määritetyn paineen ja massamenekin tulo ($GIN = p \times v$).

GIN-menetelmää on kritisoitu paljon tunnelikohteissa mm. GIN-luvussa käytettävien lukuarvojen määrittämisen vaikeuden suhteen.



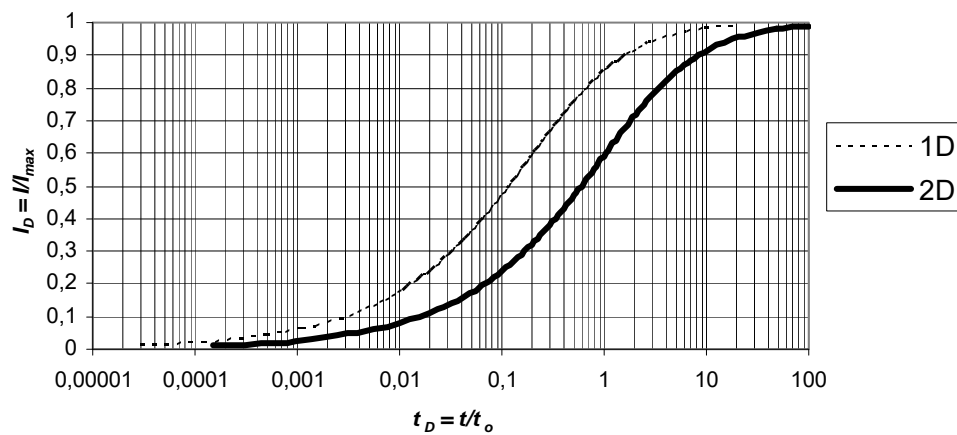
Kuva 17. Tyypillisiä GIN-käyriä patoinjektioinneissa.

GIN-menetelmä on kehitetty patoinjektointeihin ja sitä on kokeiltu kallio-injektointeissa, mutta sitä ei suositella kovan kiven alueen kallioinjektointeihin.

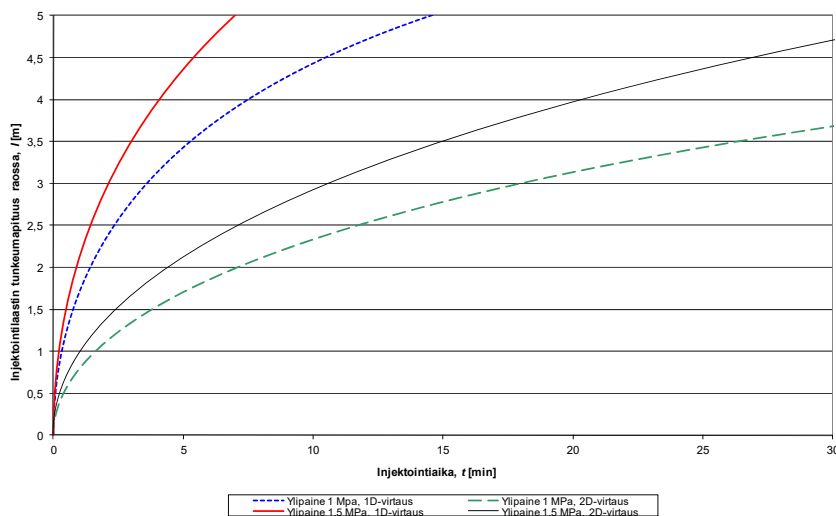
Injektointiaikaan perustuva lopetuskriteeri (Time stop -criterion)

Injektointiaikaan perustuvan lopetuskriteerin ajatus on päättää reiän injektointi tietyn pumppausajan jälkeen. Siitä on monenlaisia sovelluksia, joista yksinkertaisimmat on määritelty kemiallisille injektointiaineille, joiden pumppausaika määritetään aineen reaktioajan perusteella.

Ruotsalaiset Gustafson ja Stille (2005) ovat esittäneet sementtipohjaisen injektointimassan analyttiseen virtausmalliin perustuvan teorian, jossa määritetään tarvittava pumppausaika huomioiden kallioparametrien ja injektointimassan reologisten ominaisuuksien vaikutus. Menetelmän johtolankana on ajatus siitä, että injektointimassan teoreettinen maksimipituus mitoitusraossa ajanhetkellä $t = \infty$ voidaan laskea, jolloin laskennallisesti voidaan laskea minkä tahansa massan tunkeumapituuden injektointiin tarvittava aika, kunhan tunkeumapituus on väliltä $0 \dots I_{\max}$. Menetelmää on testattu Suomessa ja sen käytännön sovellus on kuvattu lähteessä Holmén 2007.



Kuva 18. Suhteellisen injektointiajan (t_D) ja suhteellisen tunkeuman (I_D) riippuvuus. I_{\max} saavutetaan, kun injektointiaika on ääretön.



Kuva 19. Injektointiajan ja injektointilaastin tunkeumapituuden suhde kallio-
raossa, jonka hydraulinen avauma $b_{hyd}=80 \mu m$ (ns. notkea injektointi-
laasti: myötöraja $\sigma_0=6 Pa$ ja dynaaminen viskositeetti $\mu_g=25 mPas$).

Funegah (2007) on esittänyt kolloidisen silikamassan analyyttinen virtausmallin ja kolloidisen silikamassan injektoinnin käytännön sovellus on esitetty oppikirjaksi kirjoitetussa lähteessä Funehag 2013. Menetelmän perusajatus on sama kuin sementtipohjaiselle injektointimassalle on esitetty.

Injektointiaikaan perustuvan lopetuskriteerin heikkous normaalissa kalliorakentamisessa on yleensä massan lähtöarvojen puute sekä tieto siitä, että Bingham-Plastisen nesteen myötöraja muuttuu ajan suhteen, jolloin analyyttisesti laskettu lopetuskriteeri ei ole arvioituja lähtöarvojaan tarkempi. Toimiakseen täydellisesti edellyttää laitekehitystä, jota parhaillaan tehdään Ruotsissa.

Kokemusperäiset raja-arvot

Vallitsevin käytäntö suomalaisessa kalliorakentamisessa on käyttää kokemusperäisiä lopetuskriteereitä, jotka perustuvat yleensä injektointiaineen maksimimenekkiin (esim. 200 l / reikä) tai massan virtausnopeuden pienenemiseen (esim. 0 l/min viiden minuutin ajan).

Kokemusperäisten raja-arvojen käytön heikkous on kalliomassan epähomogeenisuus, joka tekee käytännön soveltamisen vaikeaksi, mikäli raja-arvot määrittänyt henkilö ei ole mukana käytännön injektointityössä.

5.5.4.8 Kontrollointikäytäntö

Esi-injektoinnin onnistumista ennen kohdan louhintaa voi arvioida kontrolliporauskäytännöllä. Kontrolliporauskäytäntö on oikeastaan kuin tunnusteluporaus, mutta se tehdään viuhkan injektoinnin jälkeen. Kontrollireiän mittauksen raja-arvot ovat samat kuin tunnustelurei'illä. Yleensä louhintaa voi jatkaa, mikäli kontrollireiän mittauksissa raja-arvot eivät ylitä. Vastaavasti raja-arvojen ylittyessä käynnistetään täydennysinjektointi joko kohdennetusti johonkin tiettyyn suuntaan viuhkassa tai koko viuhkan alueelta kuten aiemmassakin injektoinnissa.

Kohdan louhinnan jälkeen vuotojen kontrollointi tapahtuu visuaalisesti kalliopinnoilta sekä mittaamalla vesivuotoja joko suoraan vuodosta tai mittapadoilla. Mittapadot ovat tarkkoja, mutta niiden rakentamiskustannukset ovat suuret johtuen siitä, että rakentaminen keskeyttää muun toiminnan tunnelissa tässä kohdassa. Mittapatojen hyödyntämistä rakennusvaiheen jälkeen tulisi jatkotutkia.

5.5.5 Jälki-injektointisuunnittelu

Jälki-injektointiprosessi yleensä käynnistetään, kun mahdollinen vesivuoto on havaittu tunnelin louhitulta kalliopinnoilta.

Jälki-injektoinnin suunnittelun systematisointi on erittäin vaikeaa, sillä jokainen jälki-injektointia kaipaava vesivuoto on erilainen.

Jälki-injektointia voi tehdä kaikilla samoilla materiaaleilla kuin esi-injektointikin. Kemiallisten injektointiaineiden käytön osuus on jälki-injektoinnissa suuri.

Jälki-injektoinnissa tulee huomioida työturvallisuus:

- jälki-injektoinnissa käytettävä paine kohdistuu lähelle tunnelin kalliopintaa, joten mansetin tulppa asennetaan niin kauas kuin se injektointityön kannalta on mahdollista asettaa
- jälki-injektoinnissa käytettävä paine tulee rajoittaa, tyypillinen arvo 1 MPa.

5.5.6 Injektointisuunnitelman sisältö

Injektointisuunnitelman sisältö on esitetty kohdassa 7.4.4.3.

5.6 Kuivatussuunnittelu

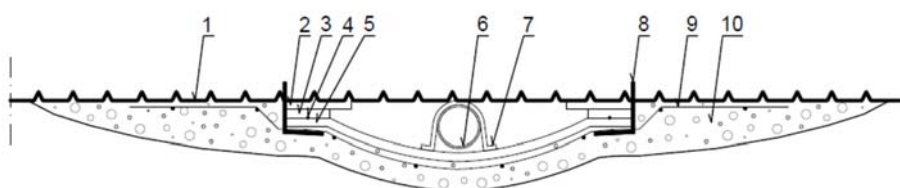
5.6.1 Vedeneristys

Tietunnelien vedeneristystä ja kuivatusta on käsitelty Liikenneviraston ohjeessa 34/2017 (Tietunnelin rakennetekniset ohjeet) kohdassa 5.2. Ohjeessa on esitelty tietunnelin eristerakenteen suunnittelu ja toteuttaminen. Samoja periaatteita voi hyödyntää muissakin tunnelityypeissä, joskin rautatietunnelissa tulee huomioida junan aiheuttaman paineiskun ja imun vaikutus verhoilurakenteisiin.

Ruiskubetonin käyttö vesieristeenä perustuu riittävään kerrospaksuuteen, jolloin veden virtaus betonikerroksen läpi on riittävän hidasta, jolloin vesi haihtuu ruiskubetonin pinnalta suoraan kalliotilan ilmaan. Ruiskubetonin vesitiivyyttä voi parantaa ruiskubetoniin sekoitettavilla lisäaineilla. Kokemusten perusteella aineet selvästi parantavat vesitiivyyttä, mutta ne eivät riitä ainoaksi kuivautusjärjestelmäksi. Näiden lisäaineiden aktivoitumis- tai toimintalämpötila on syytä tuntea.

5.6.2 Ruiskubetonoinnin salaojat

Ruiskubetonoinnin salaojan (RBSO) tarkoitus on johtaa kalliopinnan vesivuodot hallitusti pohjan salaojakerrokseen. Se myös varmistaa, että vesivuoto ei pääse ”kehittämään” pohjaveden paineesta johtuvaa kuormitusta lujitusrakenteisiin.



- | | |
|--|---|
| 1. Kallio | |
| 2. Umpisolumuovi 10mm * 75mm n. 30kg/m ³ | } solumuovit ja teräslanka
kiinnitetään vesitiiviisti yhteen |
| 3. Umpisolumuovi 10mm * 50mm n. 30kg/m ³ | |
| 4. Hehkutettu teräslanka Ø 3mm | |
| 5. Umpisolumuovi 10mm * 500mm n. 40kg/m ³ | |
| 6. Salaojaputki Ø 50mm PVC | |
| 7. Salaojaputken tuki, umpisolumuovi k500 | |
| 8. Teräskiinnike, k/k enintään 250 mm | |
| 9. Tukiverkko Ø3.4mm, #100mm, leveys 800mm | |
| 10. Ruiskubetoni RBM30 (leveys 1000mm) | |

Kuva 20.

Ruiskubetonoinnin salaojan tyyppisuunnitelma (InfraRYL/2018).

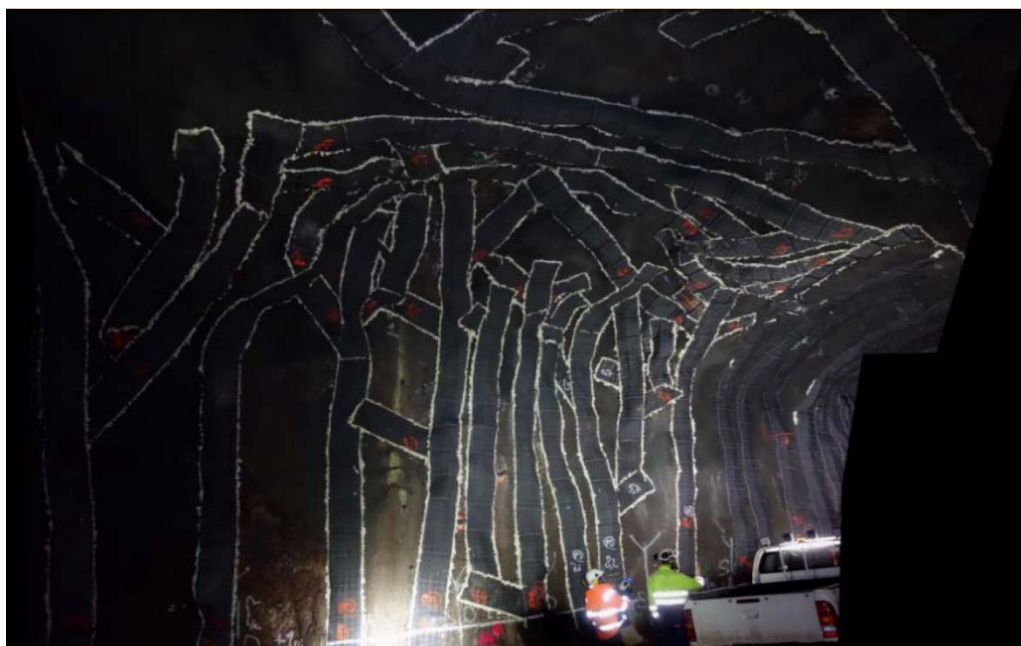
Ruiskubetonoinnin salaojan päälle tulee tukiverkko, jonka tehtävä on pitää salaoja paikallaan ruiskubetonoinnin ajan. Ruiskubetonoinnin salaojaan ei tule suunnitella asennettavaksi tukiverkon korokepaloja, sillä verkon tehtävä ei ole toimia raudoitteena.



Kuva 21. Hallitilan holviin asennettuja ruiskubetonoinnin salaojia (kuva: Ulla Sipilä).

Ruiskubetonisalaojien tarkat sijainnit määritellään työmaalla, suunnitelmissa tulee kertoa kenen toimesta. Suunnittelija määrittää ruiskubetonisalaojan rakennetyypin suunnitelma-asiakirjoissa. Ruiskubetonoinnin salaojan (RBSO) osien materiaalit kuvataan tyyppipiirustuksessa tai viitataan InfraRYL/2018 kuvaan 15320:K1.

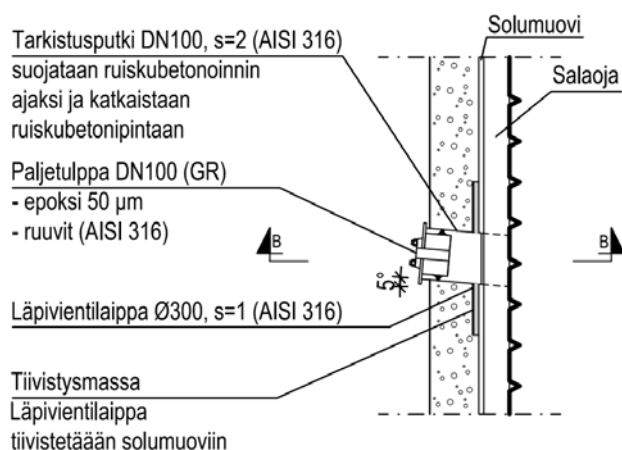
Ruiskubetonoinnin salaojarakenteen kohdalla kalliota lujittava ruiskubetoni ei ole kiinni kalliopinnassa. Koska ruiskubetonin kalliota lujittava vaikutus perustuu pääosin ruiskubetonin tartuntaan kallioon, tulee ylimääräisten/turhien ruiskubetonisalaojien asentamista välttää ja asentaa ojat vain tarpeellisiin kohtiin. Vain osittain profiilin kattavia ruiskubetonisalaojia sekä ns. oksia tulisi suosia.



Kuva 22. Liian tiheästi asennettuja ruiskubetonoinnin salaojia. Ruiskubetoni tulisi mitoittaa kantavaksi kuorirakenteeksi, tai osa asennetuista ojista purkaa ja korvata muilla ratkaisuilla (kuva: Ioannis Konstantas).

Erityisesti liikennetunneleissa tulee varmistaa ruiskubetonoinnin salaojien jäätymisriskin hallinta, jotta rakenne ei hajoa sulamis-jäätymis-prosessissa tapahtuvan paisumisen johdosta. Tyypillisiä keinoja on käyttää ruiskubetonisalojituksia eristerakenteen välitilassa tai asentaa rakenteen salaojaputkeen saattolämmitys. Saattolämmityksen tehona on käytetty tyypillisesti 50 w/m.

Ruiskubetonoinnin salaojiin voi suunnitella tarkastusputken avulla huuhteluyhteen, jonka kautta voi käytön aikana varmistaa ruiskubetonisalojan toimivuus koko rakenteen käyttöiän ajan.



Kuva 23. Esimerkki ruiskubetonoinnin salaojan huuhteluyhteestä.

Ruiskubetonoinnin salaojista on kehitetty myös ns. mikrosalaojaverkkoon perustuvia ratkaisuja, joita on testiluonteisesti kokeiltu muutamissa kalliorakennuskohteissa Suomessa ja Ruotsissa. Järjestelmän toiminta edellyttää tarkalleen määrättyä tasauskerroksia ja ruiskubetonikerroksia, jolloin niiden käyttö on todettu hitaaksi, hankalaksi ja kalliiksi.



Kuva 24. Mikrosalaojaverkkojen päitä tunnelin seinän pohjalla (kuva Kalle Hollmén).

5.6.3 Vuotoa ohjailevien tekstiilien käyttö

E erityisesti Norjassa on käytetty vesien ohjauksessa tekstiileitä, joilla voidaan tunnelin sisällä ohjata vuotovesiä kootusti keräyspisteisiin. Näiden tekstiilien (esim. Tunnelduk) palo-ominaisuudet ovat tunnelikäyttöön soveltuvia.

Tekstiilien käyttö liikennetunneleissa tulee tarkastella erikseen.



Kuva 25. Kalliotilan holvin kuivatus vuotokankaan avulla. Vuodot kerätään holvin reunoilta vesikouruilla ja ränneillä pohjan salaojakerrokseen (kuva Kalle Hollmén).

5.6.4 Pohjan salaojat

Tunnelin pohjan salaojituksen suunnittelun periaate on sama kuin kalliolle perustetun rata- tai tielinjauksen tyyppipoikkileikkaus. Kuivatus suunnitellaan Liikenneviraston ohjeen 5/2013 (*Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu*) periaatteiden mukaisesti.

Rautatietunneleiden normaalipoikkileikkauksessa on kuivatusjärjestelmät tunnelin molemmilla puolilla, mutta kalliorakentamisessa nykyinen käytäntö on isoja halleja luokkuun ottamatta usein johtanut yksipuoleiseen kuivatukseen, jossa tunnelin pohjan riittävällä vietolla on varmistettu veden ohjautumisen kuivatusjärjestelmiin. Kuivatus- ja viemäröintijärjestelmien suunnittelussa tulee huomioida pakkasen vaikutus.

Pohjan salaojien suunnittelu saattaa edellyttää pohjan louhintasuunnittelua (kuoppa-, kanaali- ja syvennyslouhinnat). Louhintasuunnitelmissa huomioidaan InfraRYL/2018 vaatimukset. Suunnitelmissa tulisi määrittää saako pohjan louhintoja esim. kanaaleiden osalta toteuttaa perän louhinnan yhteydessä vai tuleeko ne suorittaa erillisenä jälkilouhintana. Esimerkiksi Tampereen Rantaväylän Rantatunnelissa kanaalilouhinnat suoritettiin perän louhinnan yhteydessä.

5.7 Radonin hallinta tunnelissa kallioteknisin ratkaisuin

Radon-kaasu on hajuton, mauton ja näkymätön radioaktiivinen jalokaasu. Radon syntyy maankuoressa ja kaikessa kiviaineksessa jatkuvasti uraanin ja toriumin hajoamisen välituotteena. Radon esiintyy kaasuna ja on inertti muiden aineiden suhteen. Radon liikkuu helposti avoimissa tiloissa ja raoissa niin kaasuna kuin pohjaveden mukana. Vapaalla pinnalla virtaava pohjavesi on omiaan mahdollistamaan radonkaasun vapautumisen tunneliin.

Tunnelia ympäröivän kalliomassan tiivistäminen ehkäisee radonin kulkeutumista tunneliin, sillä vuotovesi on pääasiallinen radonin lähde tunneleissa. Muita keinoja on estää pohjaveden vapaa virtaaminen tunnelitiloissa tehokkailla kuivatusratkaisuilla (ruiskubetonoinnin salaojat, pohjan salaojituskerroksen salaojat ja vuotovesiviemärit). Tuuletukseen liittyvät ratkaisut on kuvattu tunnelin LVI-suunnittelun ohjeessa.

6 Kalliotunnelin rakennusgeologinen kartoitus

6.1 Yleistä

Kalliolaatua seurataan louhinnan etenemisen myötä ja luokitellaan Suomessa tyypillisesti käytettyjen Q-luokituksen ja rakennusgeologisen kallioluokituksen mukaisesti. Kalliolaadun seurannassa varmistetaan, että aiemmin tutkimuksissa tehty kallion rakenteellinen tulkinta on riittävällä tarkkuudella oikea, sillä sitä on käytetty lujitus suunnittelun lähtötietona. Kohteen yksityiskohtaisia louhinta- ja lujitus suunnitelmia tarvittaessa täydennetään louhinnan edetessä kalliolaadun seurannan perusteella. Rakennusgeologisten kartoitustietojen perusteella suunnittelija määrittää kohteen lopulliset, louhinnan jälkeen tehtävät lujitukset kallio-olosuhteita vastaaviksi.

Kalliotunneleissa kalliopinnat peitetään ruiskubetonoinnilla ja muilla mahdollisilla rakenteilla, jolloin tiedot kalliotunnelin kantavan rakenteen ominaisuuksista on kattavasti tallennettu vain rakennusgeologisen kartoituksen raportointiin. Alueen jatkorakentamiseen saadaan arvokasta tietoa juuri olemassa olevan kalliotunnelin kalliolaadusta. Asianmukaisesti tallennetut kallion laadun kartoitustiedot ovat erityisen arvokkaita, jos kalliorakennuskohteen läheisyyteen suunnitellaan myöhemmin toista kalliotilaa tai jos olemassa olevaa kalliotilaa päädytään tulevaisuudessa laajentamaan. Kootut kalliotiedot ovat myös arvokasta perustietoa kalliorakentamisen tutkimukselle ja kehittämiselle. Keskitetysti taltioituna ne lisäisivät myös Suomen kalliooperän yleistä tuntemusta (Gardemaister et al. 1976).

6.2 Kartoitusta koskevat määräykset ja ohjeet

6.2.1 Kansallinen lainsäädäntö

- Sisäasiainministeriön asetusta väestönsuojien teknisistä vaatimuksista ja väestönsuojien laitteiden kunnossapidosta (506/2011).
 - o 8 § "...kansainvälisesti hyväksyttyä Q-luokituksen määrittelytapaa kallion laatuluokista."

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110506>

Muuta kansallista lainsäädäntöä koskien louhintatyönaikaista rakennusgeologisesta kartoitusta ei löydetty.

6.2.2 Liikenneviraston ohjeet

- Liikenneviraston ohjeita 21/2014, Taitorakenteiden suunnittelun lähtötieto-ohje
 - o Kalliotunnelin lähtötietojen hallintaa koskevia Liikenneviraston ohjeita
- Liikennevirasto 10/2015, Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, suunnitteluvaiheen ohjaus.
 - o Ohjeessa määritetään tie-, rata- ja vesitiehankkeiden maa- ja pohjarakenteiden suunnittelussa ja rakentamisessa lähtötietoina tarvittavat geo- ja kalliotekniset tutkimukset ja mittaukset sekä niiden sisältö ja määrä suunnitteluvaiheittain.
 - o Ohje toimii Eurokoodi 1997:n osan 2 soveltamisohjeena, mutta ohje ei sisällä vaatimuksia kalliotunneleiden erityistutkimuksille.
 - o Geotekniset tutkimukset ja mittaukset -ohje kattaa kaikkien väylämuotojen geotekniset ja kalliotekniset tutkimukset.
 - o Ohjeen kappaleessa 8.2 on käsitelty Infra-pohjatutkimusformaattia ja tietomallia
- Liikennevirasto ohje 12/2017: Tie- ja ratahankkeiden inframalliohje
 - o Ohjeessa on kuvattu miten käsitellään lähtötietoja digitaaliseen muotoon jäsennellyinä.
- Ratatekniset ohjeet Rato 18 Rautatietunnelit
 - https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2018-19_rato18_rautatietunnelit_web.pdf
 - o Kohdassa 18.6.9 määritetään kalliotunnelissa tehtävät tutkimukset

6.2.3 Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit

- SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus
 - o Eurokoodin mukainen kallionluokitusmenetelmä on SFS-EN 14689
 - o kohdan U.2 mukaan muitakin julkaistuja ja paikallisesti hyväksytyjä luokitusjärjestelmiä voidaan käyttää, mikäli käy ilmi jäljitettävissä oleva viittaus.
- SFS-EN 14689-1 Geotekninen tutkimus ja koestus. Kallion tunnistaminen ja luokitus. Osa 1: tunnistaminen ja kuvaus.
 - o standardi määrittää kallion tunnistamisen ja luokittelun ns. ISO-luokituksella
- ISO-maa- ja kallioluokituksen soveltamisohje Suomessa
 - o Suomen Geoteknillisen yhdistyksen julkaiseman soveltamisohjeen avulla ISO-luokitus voidaan ottaa käyttöön Suomessa
 - <http://www.ril.fi/kirjakauppa/product/show/11/ekirjat/611/iso-maa-ja-kallioluokituksen-soveltamisohje-suomessa-ekirja%20>

6.2.4 Alan yleiset tekniset ohjeet

- ISO-maa- ja kallioluokituksen soveltamisohje Suomessa
 - <http://www.ril.fi/kirjakauppa/product/show/11/ekirjat/611/iso-maa-ja-kallioluokituksen-soveltamisohje-suomessa-ekirja%20>
- Q-luku -menetelmä
 - <https://www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise-A-Z/Engineering-geology-and-rock-mechanics/Q-system>
 - <https://www.ngi.no/eng/content/download/4014/431191/version/1/inLanguage/nor-NO/file/Handbook%20The%20Q-system%202015%20nettutg.pdf>
- Rakennusalan kallioluokitus

- Rakennusalan kallioluokitus, VTT, Geoteknillinen laboratorio, tiedonanto 12. 1974.
 - järjestelmä määrittää RG-kartoituksen parametrit
- Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen, VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 25. 1976.
 - Julkaisussa on esitetty suositus louhittujen tilojen kallio-tietojen tallennustavasta.

6.2.5 Kaupunkien ja kuntien ohjeet

Kaupunkien ja kuntien kartoitusta koskevia ohjeita tai suosituksia ei tässä työssä tunnistettu.

6.2.6 Pohjoismainen ohjeistus

6.2.6.1 *Norja*

- Statens Vegvesen: Håndbok N500 Vegtunneler
 - Norjan tielaitoksen ohje joka määrittelee tietunnelin laatuvaatimukset
 - vaatimukset insinöörigeologiselle loppuraportille julkaisun luvussa 10.2
 - https://www.vegvesen.no/_attachment/61913
- Statens Vegvesen: Håndbok V520 Tunnelveiledning,
 - täydentää em. ohjeen laatuvaatimuksia ohjeilla ja suosituksilla
 - ohjeet geologiselle loppudokumentoinnille julkaisun luvussa 10.1
 - https://www.vegvesen.no/_attachment/1597247/binary/1144089

6.2.6.2 *Ruotsi*

- Trafikverket: TDOK 2016:0231 Krav Tunnelbyggande
 - määrittelee tunnelin laatuvaatimukset Ruotsin liikenneviraston tie- ja rautatiehankkeissa.
 - vaatimukset kalliotunnelin kartoituspiirustukselle julkaisun luvussa 3.3.5
- <http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=cc943b78-c6d5-4d3f-ba48-a82e45af805d>

6.2.7 Muu ulkomainen kirjallisuus

Ulkomaisia kartoitusta koskevia ohjeita tai suosituksia ei tässä työssä tunnistettu.

6.3 Kalliotunnelin rakennusgeologisen kartoituksen toteutus

6.3.1 Työnaikainen rakennusgeologinen kartoitus

Louhittavan kohteen rakennusgeologinen kartoitus tehdään louhintatyön edetessä ja dokumentoidaan kattavasti. Kalliorakennesuunnittelija vertaa tuloksia kalliolaadusta ja kallio-olosuhteista lujitussuunnitelman perusteisiin, jotka perustuvat puolestaan kalliotutkimustuloksiin ja niistä tehtyihin geologisiin tulkintoihin. Jos kalliolaatu osoittautuuakin louhintavaiheessa lujitussuunnitelmien pohjana ollutta tulkintaa poikkeavaksi, on kalliomekaanisia rakennelaskelmia ja niiden perusteella tehtyjä louhinta- ja lujitussuunnitelmia tarkistettava vastaavasti.

Kartoitusta suoritetaan kohteeseen sopivin välein esim. kerran viikossa tai kun louhinta on edennyt 2–3 katkoa. Kartoituksen tavoitteena on määrittää paljastuneen kallion laatu, jonka perusteella kalliorakennesuunnittelija määrittää tunnelin lujitustarpeen (välittömät lujitustoimenpiteet sekä lopullinen lujitustarve). Lisäksi kartoituskäynnillä todetaan ja paikannetaan myös vesivuodot ja kalliorakennesuunnittelija määrittää tarvittaessa jälki-injektointitoimenpiteet.

Kartoitushavainnot tehdään puhtaista kalliopinnoista. Havainnot on kyettävä paikantamaan esim. paalulukemien mukaan ja suuntaamaan kompassin avulla. Yksityiskohdaisia havaintojen tekoa helpottaa tutkittavien pintojen tai alueen yleistarkastus (Gardemaister et al. 1976). Ennen kartoitusta kalliopinnot tulisi pestä painevesipesuna. Kartoitusajankohdiksi tulisi kartoitettavalle alueelle saada tehokas yleisvalaistus. Rakennusgeologisen kartoituksen tukena voidaan tehdä myös louhitun tilan 3D-valokuvasta. 3D-valokuvista voidaan lisäksi suorittaa jälkikäteen rakennusgeologista kartoitusta paikan päällä tehdyn varsinaisen kartoituksen lisäksi, erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa kartoittava geologi ei voi turvallisuussyistä tehdä kartoitusta paikan päällä.

Työmaalla kalliolaadun kartoituksessa kiinnitetään erityisesti huomioita rikkonaisten kallio-osien rajaamiseen ja rakennetyypin määrittämiseen sekä vesivuotojen paikallistamiseen ja vuotovesimäärään. Kartoituksessa tulisi käyttää apuna kartoituslomaketta. Tällä hetkellä Suomessa jokaisella kalliorakennesuunnitteluun erikoistuneella suunnittelutoimistolla on käytössä omiin toimintatapoihin parhaiten soveltuma toimistokohtainen kartoituslomake, mutta Liikenneviraston kohteisiin voisi yhdenmukaistaa esimerkkilomakkeen vähimmäisvaatimusten osalta tiedon arkistoinnin näkökulmasta. Yhdenmukaisen esimerkkilomakkeen tavoitteena on, että kallio-olosuhteiden kuvailu ja luokitus sekä määritettävät parametrit olisi mahdollisimman yhdenmukaisia, vaikka tunnelia kartoittaisi eri henkilöt. Tästäkin huolimatta kallioparametrien määrittäminen riippuu olennaisesti yksittäisen henkilön tulkinnasta.

Työnaikainen rakennusgeologinen kartoitus tehdään työmaakäynnillä louhitusta kalliotilasta louhinnan edistymisen myötä. Kartoituksesta vastaa hankkeeseen nimetty geologi. On suositeltavaa valokuvata kalliopinnot ja nimetä valokuvat esim. tunnelin paaluluvun mukaan (paikannustieto). Hyvän suunnittelukäytännön mukaisesti geologi raportoi havainnot välittömästi työmaakäynnin jälkeen kalliorakennesuunnittelijalle, joka tekee tarvittaessa tunnelin lujitussuunnitelmaan tarvittavat päivitykset. Hyväksi

käytännöksi on havaittu myös, että kohteen kalliorakennesuunnittelija ja geologi käyvät yhdessä työmaalla kartoituskäynnillä ja laativat arvion lujitussuunnitelmiin tulevasta muutoksista huomioden, että kaikki lujitusratkaisut eivät pelkästään kalliolaatu-riippuvaisia.

Kartoituskäynnillä kohteesta määritetään soveltuvien osien kohdassa 4.3 määritettyjen kallioluokitusten parametrit, joiden lisäksi määritetään erikseen:

- vesivuodot ja havainnointipäivämäärä
 - o eriteltynä vesivuodosta aiheutuvaa kosteutta -kohdat ja tippuvat vesivuodot -kohdat
- laskettu Q- tai Q'-arvo
 - o on tärkeää, että käytetään systemaattisesti joko Q-arvoa tai Q'-arvoa
 - o RQD-luvun ollessa 0...10 käytetään Q-luvun laskennassa RQD-luvulle arvoa 0
 - o riistysalueilla ja suuaukoilla Q-luku määritellään käyttämällä $J_n' = 3 \times J_n$ [risteys] ja $J_n' = 2 \times J_n$ [suuaukko], muualla $J_n' = J_n$, dokumentissa tuotava selvästi ilmi J_n :n kertoimen käyttö
 - o on tuotava selvästi ilmi se rakosuunta, joka valittiin merkittäväksi rakoiksi ja josta määritettiin J_r - ja J_a -arvot
 - o heikkousvyöhykkeille ja niiden vaikutusalueille tulee määrittää erillinen Q-luku (Q_z) Q-lukuohjeen mukaan

Kartoitusta suoritettaessa tulisi myös huomioida erityisesti heikkousvyöhykkeiden savenmäärää ja sen esiintyvyyden laajuutta. Heikkousvyöhykkeet tai rakosysteemit, jotka sisältävät merkittävästi kalliosavea, tulisi savesta ottaa näyte paisuvahilaisten mineraalien määrittystä varten.

Tarvittaessa kartoituskäynnillä tehdään havaintoja vuotokohtien veden laadusta (esim. väri, haju, sameus, suolaisuus). Kartoituskäynnillä voidaan ottaa vesinäytteitä laboratoriotutkimuksia varten (esim. ruiskubetonisalojen tukkeutumisvaara tai veden aggressiivisuuden tutkiminen).

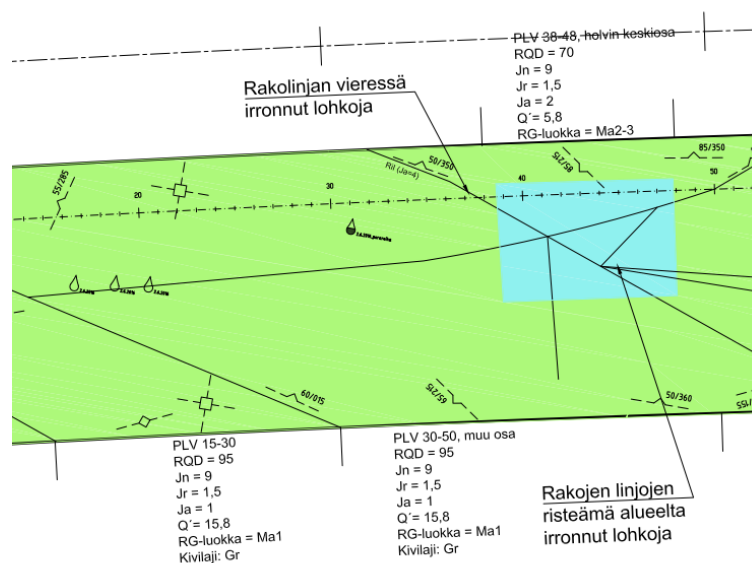
Pelkkien holvi- ja seinäpintojen tarkkailu ei anna luotettavaa kuvaa koko kalliotilan vuotovesimäärästä. Toisinaan tunnelin pohjassa saattaa olla vesivuotoja, joita on vaikea havaita. Kohteeseen on tarpeen mukaan rakennettava mittapatoja tai vuotovesimäärän havaintoja/mittauksia voidaan tehdä pumppaamopaikoilta.

6.4 Tunnelin rakennusgeologisen kartoituksen tulosten dokumentointi

Vakiintuneiden käytäntöjen mukaisesti työnaikaisen rakennusgeologisen kartoituksen kartoitustiedot on esitetty tunnelin ns. aukilevitetyllä vaippakuvalla, johon on merkitty suunnitellun tunnelin sijainti ja tunnelin seinät sivuille aukilevitettyinä. Karttapohjaan merkitään kohdassa 4.3 esitetyt tiedot sekä heikkousvyöhykkeiden ja merkittävien rakojen sijainti, kulku, kaade ja kaateen suunta. Lisäksi karttapohjaan merkitään rasteilla alueet, joita ei päästy kartoittamaan esim. työturvallisuuden vuoksi suoritettuna ruiskubetonoinnin takia. Nykyisellään geologisen kartoituksen lopputuotteena syntyy useita lomakkeita ja piirustuksia. Yksittäisten kartoituslomakkeiden perusteella laaditaan yhtenäinen rakennusgeologinen kuvaus.

Karttapohjaan kerätään myös käytetyt symbolit ja symbolien selitykset. Kalliolaatu voidaan jaotella värikoodein. Kivilaadun, rakoilun, rikkonaisen kallion sekä vesivuotojen kuvauksen pääpainon tulee olla lomakkeen piirrososassa, jota täydennetään tekstiosalla. Vesivuodoista kirjataan vuotojen määrä sekä havainnointiajankohta.

Geologisen kartoituksen dokumentoinnin tulisi kuitenkin siirtyä mallipohjaiseen toimintaan. Liikenneviraston ohjetta 12/2017 tulisi soveltaa myös geologisen kartoituksen dokumentoinnin osalta, koska mallinnus tuo uusia työtapoja ja mahdollisuuksia sekä vaatimuksia hankkeiden läpivientiin ja lopputuotteisiin. Lisäksi tutkimukset arkistoidaan yhdessä projektin muun aineiston kanssa.



Kuva 26. Ote rakennusgeologisesta karttapiirroksesta.

Tämän selvitystyön kirjoittamisen yhteydessä on havaittu tarve laatia esimerkkilomakepohja työnaikaiselle kartoitustuloksen dokumentoinnille.

7 Kalliotekniset suunnitelmat

7.1 Yleistä

Kalliorakennussuunnittelussa tuotetut suunnitelmat (kalliotekniset suunnitelmat) sisältävät yleisellä tasolla kallion tiivistys-, lujitus- ja louhintasuunnitelmat sekä näiden laatimisen perusteena käytetyt laskelmat. Lisäksi suunnitelmakokonaisuudessa raportoidaan kalliotutkimusten ja tarpeellisten pohjatutkimusten tulokset, geologiset tulokset sekä esitetään seuranta- ja tarkkailusuunnitelmat tutkimusohjelmineen. Varsinaiset tiivistys-, lujitus- ja louhintasuunnitelmat koostuvat selostuksista ja piirustuksista ja/tai malleista. Piirustusten ja mallien keskinäinen asema määritellään hankekohtaisesti.

Kalliotekniset ratkaisujen tulee olla ympäristöllisesti ja teknisesti toteuttamiskelpoisia, järkeviä, taloudellisia ja teknisesti moitteettomia. Suunniteltujen ratkaisujen tulee olla turvallisia toteuttaa. Kohteen louhinta-, lujitus- ja tiivistyssuunnitelmat on laadittava siten, että ympäristöriskit ja muodonmuutokset ovat hallinnassa ja pysyvät kalliorakenteet ovat ehjiä ja stabiileja.

Jos käytettävien materiaalien tai järjestelmien valintaan jää vapautta, suunnitteluasiakirjassa tulee esittää projektikohtaiset vaatimukset, jotka saattavat vaikuttaa lopulliseen valintapäätökseen.

Tässä luvussa selvitetään varsinaisten suunnitelmadokumenttien laatimista. Suunnitelmadokumenttien laatimisen edellyttämät suunnitteluratkaisujen (esim. lujitussuunnittelu) laatimisen edellyttämät selvitykset ja tutkimukset sekä seurannat on esitetty aiemmin tässä selvitystyössä.

7.2 Kallioteknisiä suunnitelmia koskevat määräykset ja ohjeet

7.2.1 Kansallinen lainsäädäntö

- Ympäristöministeriön asetus rakentamista koskevista suunnitelmista ja selvityksistä (216/2015)
 - o ottaa yleisellä tasolla kantaa suunnitelmien sisällöstä, ei erittele erikseen esim. kallioteknisiä suunnitelmia
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150216>
 - o Asetuksen perustelumuistio:
www.ym.fi/download/noname/%7B4BE96E11-C32A-4CF3-A1AE-2B89DD919DCD%7D/109142
- Ympäristöministeriön ohje rakentamista koskevista suunnitelmista ja selvityksistä (YM3/601/2015)
 - o selvittää suunnitelmien sisältövaatimuksia asetuksia tarkemmin
 - o erityissuunnitelmissa mainitaan ”*kalliorakennustekninen suunnitelma*”

https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/Ymparistoministerion_ohje_rakentamista_koskevista_suunnitelmista_ja_selvityksista.pdf

7.2.2 Liikenneviraston ohjeet

- Liikennevirasto 30/2014, Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastusohje
 - o esittelee kohdassa 2.6.4 geoteknisen luokituksen (GL1, GL2, GL3) soveltamisen tunneleihin
 - o esittelee kohdassa 5.1.5 kalliorakenneteknisen suunnitelmien tarkastukseen sisältyvät dokumentit

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2014-30_taitorakenteiden_rakennussuunnitelmien_web.pdf
- Liikennevirasto 23/2013, Louhintatyöt rautatien läheisyydessä
 - o on toteutusvaiheen ohje toteuttajalle, ei sisällä kallioteknisen suunnittelun asioita, mutta asiakirjana tulee olla viitattu louhintaa kuvaavissa työselostuksissa

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2013-23_louhintatyot_rautatien_web.pdf

7.2.3 Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit

- ei tunnistettuja dokumentteja

7.2.4 Alan yleiset tekniset ohjeet

- Kalliotilat, RT 91-10655
 - o esittelee kalliotilan suunnittelun ja toteutuksen tärkeimpiä lähtökohtia
- Kalliorakennussuunnittelu tehtäväluettelo KAT18, RT 10-11296
 - o sisältää kalliorakennushankkeen, kalliorakennesuunnittelijan ja kalliorakennussuunnittelijan tehtäväluettelon eli hankevaiheiden tehtävät
 - o sisältää alan teknisen, sopimuksissa käytettävän termistön
- Esitystapaohjeet, rakennuspiirustukset, RT 15-10635
 - o sisältää rakennuspiirustusten kuvaustavat, mittakaavat, viivat, tekstit, lyhenteet
- Mitoitusten esittäminen, rakennuspiirustukset, RT 15-10641
 - o sisältää rakennuspiirustusten mitoitusapojen esittämisen
- Piirustuslehti, rakennuspiirustukset, RT-15-11124
 - o sisältää mm. ohjeita rakennuspiirustuslehdistä, muutosmerkinnöistä ja nimiöistä

7.2.5 Kaupunkien ja kuntien ohjeet

Työssä ei tunnistettu kaupunkien erillisiä ohjeita.

7.2.6 Pohjoismainen ohjeistus

Ruotsi: TDOK 2016:0231 Krav Tunnelbyggande

- määrittelee tunnelin laatuvaatimukset Ruotsin liikenneviraston tie- ja rautatiehankkeissa.
<http://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=cc943b78-c6d5-4d3f-ba48-a82e45af805d>
- vaatimukset tunnelin liittyvien selvitysten ja suunnitelmien sisällöstä ja esitystavasta julkaisun liitteessä 3 (Bilaga 3 Redovisningskrav)

7.3 Kallioteknisten suunnitelmien periaatteet eri hankevaiheissa

Suunnitelmien periaatteista, sisällöstä ja tavoitteista löytyy yleistasoisesti Liikenneviraston ohjeistuksista. Perinteisten kohteiden kalliorakennussuunnittelun osalta hankevaiheittaiset tavoitteet ja toimenpiteet on kuvattu kalliorakennussuunnittelun tehtäväluettelo KAT18:ssa (RT 10-11296). Nämä huomioiden alla olevaan taulukkoon on hahmoteltu kallioteknisen suunnitelmien periaatteet, sisällöt ja tavoitteet Liikenneviraston kohteissa eri suunnitteluvaiheessa (Taulukko 17).

Taulukko 17. Kallioteknisten suunnitelmien periaatteet eri suunnitteluvaiheissa.

Suunnittelu-vaihe	Suunnitelma-asia-kirjojen sisällöllinen tavoite	Suunnitelma-asiakirjat
Esiselvitysvaihe	kalliotekniset suunnitelmat osana muuta suunnitelmakokonaisuutta perustelevat tilahankinnan tarpeellisuuden tai olemassa olevan tilan muutostarpeen	<ul style="list-style-type: none"> - rakennettavuusselvitys - karttaliitteet - hankesuunnitelman kalliotekninen selostusosa - alustavat kalliotekniset suunnitelmaratkaisut (pohjapiirustus, pituus- ja poikkileikkaukset, periaatepiirustukset) - tutkimussuunnitelmat
Yleissuunnitteluvaihe	yleispiirteiset kalliotekniset suunnitelmat ovat toteuttamiskelpoiset ja mahdollistavat kustannusarvion laatimisen vaihtoehtotarkastelut kustannusarvio (toteutuskustannukset)	<ul style="list-style-type: none"> - ajantasainen lähtötietomalli - lähtötietoluettelo - täydennetyt kalliotutkimusasiakirjat - kalliotutkimussuunnitelmat ja -ohjelmat - kalliomekaanisten laskentojen suunnitelma - rakennettavuusselvitys/-raportti - louhinnan laajuuden tietomalli tai 3D-malli tai pohjapiirustus ja leikkaukset - tietomalliselostus - määrä- ja kustannusarvio - pohjaveden hallinnan yleissuunnitelma - suunnitelmaselostus, joka sisältää vaihtoehtotarkasteluiden dokumentoinnin
Tie-/ratasuunnitelma-vaihe	kalliorakennesuunnitelmat, joissa on esitetty lopullinen tilavaraus kaavoituksen sekä aluevarausten ja käyttöoikeuksien lopullisen määrittelyn edellyttämällä tarkkuudella	<ul style="list-style-type: none"> - ajantasainen lähtötietomalli - lähtötietoluettelo - täydennetyt kalliotutkimusasiakirjat - kalliotutkimussuunnitelmat ja -ohjelmat - kalliomekaanisten laskentojen suunnitelma - louhinnan laajuuden tietomalli tai 3D-malli tai pohjapiirustus ja leikkaukset - tietomalliselostus - peruslujituspoikkileikkaus - suunnitelmaratkaisut rikkonaisten kallio-osuuksien ja/tai vaativien rakenteiden osalta - seurantamittaussuunnitelmat - suunnitelmaselostus
Rakennussuunnitelma-vaihe	rakentamisen ja hankinnan edellyttämät mitoitettut kalliotekniset suunnitelmat suunnitelma seurantamittauksiin	<ul style="list-style-type: none"> - ajantasainen lähtötietomalli - lähtötietoluettelo - täydennetyt kalliotutkimusasiakirjat - kalliotutkimussuunnitelmat ja -ohjelmat - suunnitelma rakentamisen aikaisista seurantamittauksista (kalliomekaniikka, pohjavesi) - ennusteet mittaustulosten käyttäytymisestä rakentamisen aikana - laskentaraportti kalliotilojen ja rakenteiden mitoituksista - louhinnan laajuuden tietomalli tai 3D-malli tai pohjapiirustus ja leikkaukset (louhinta, lujitus ja tiivistys) - tietomalliselostus - kalliorakennustöiden työselostus - ympäristöselvitys - turvallisuusasiakirja - yksityiskohtaiset määräluettelot
Rakentamisvaihe	Lopulliset lujitus- ja tiivistyssuunnitelmat	<ul style="list-style-type: none"> - kalliorakenteen tarkistetut ja täydennetyt / lopulliset louhinta-, lujitus- ja tiivistyssuunnitelmat - toteumapiirustukset ja/tai toteumamalli (tietomalli tai 3D-malli) - tietomalliselostus

7.4 Suunnitelma-asiakirjojen sisältö

Kallioteknisten suunnitelma-asiakirjojen sisällöstä eri hankevaiheissa ei ole olemassa yksittäistä ohjeistusta, joten alle on kuvattu alan hyvien käytäntöjen mukaisia tapoja. Niissä ei ole otettu kantaa piirustusten ja mallien väliseen suhteeseen, joka on tois-
taiseksi hankekohtaisesti päätettävissä.

Rautatietunnelin osalta suunnitelmaan sisältyvät *Radan suunnitteluohjeessa* luetellut asiakirjat. Asiakirjoilta vaadittu sisältö on esitetty *Radan suunnitteluohjeessa* ja sen liitteenä olevassa tehtäväluettelossa. Piirustusten sisältö ja rakenne on esitetty *Rata-tekni-
sissä piirustusohjeissa*. *RATO 18:n* luvuissa 18.5.1.1–18.5.1.8 on täsmennetty tun-
neleiden suunnitelmien tarkkuustasoa ja sisältöä, mutta ei täsmennä kallioteknisten
suunnitelmien sisältöä hankevaiheittain ja esittelee kalliotekniikan osalta lähinnä ra-
kennussuunnitelmavaiheen sisällön.

Liikenneviraston inframalliohje ottaa kantaa yleispiirteisellä tasolla kallioteknisissä
tietomalleissa esitettäviin asioihin louhinnan osalta hankevaiheittain.

7.4.1 Kalliotekniset suunnitelmat esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaiheissa

Esisuunnitelma- ja tarveselvitysvaiheessa kalliorakennussuunnittelija määrittelee
tarpeeseen parhaiten sopivat kallioresurssit kartta- ja maastotarkasteluin. Vaiheessa
laaditaan selvitys kallioiperästä. Alustava kalliotekninen rakennettavuus esitetään
rakennettavuusselvityksessä, jonka muotoa ei ole määritetty, mutta on yleisimmin
tekstidokumentti. Tässä dokumentissa esitetään myös kallioteknisten tutkimusten,
selvitysten ja mittauksen tarve seuraavan vaiheen suorittamiseksi.

7.4.2 Kalliotekniset suunnitelmat yleissuunnitelmavaiheessa

Yleissuunnitelmavaiheessa kalliotekniseen suunnitteluun kuuluu ratahankkeissa
”B20, Radan suunnitteluohjeen” kohdassa 22 mainittujen kohtien kalliotekninen
suunnittelu sekä suunnitteluryhmän asiantuntijana toimiminen ja mm. kallioteknisen
asiantuntemuksen tuominen kaikille suunnittelun osa-alueille.

Yleissuunnitelmavaiheessa kalliorakennussuunnittelun tarkoituksena kehittää edellis-
ten suunnitelmavaiheiden suunnitelmaa toteutuskelpoiseksi yleissuunnitelmaksi, mikä
edellyttää kallioteknisen perusratkaisujen tuottamista.

Yleissuunnitelman kallioteknisissä suunnitelmissa esitetään kalliotunnelin sijainti ja
korkeusasema suhteessa kalliopintaan. Suunnitelmassa tulee näyttää tunnelin teo-
reettinen louhinta (ääriviivat) vähintään profiililouhintojen osalta. Kuoppien, kanaalien
ja syvennysten louhintojen esittäminen ei ole tarpeellista, mikäli ne eivät ole merkittä-
viä. Mitoitusten osalta suunnitelmista on käytävä ilmi päämitat (pituus, leveys ja kor-
keus). Kallion mekaanisten lujitusrakenteiden osalta esitetään tyyppiratkaisut siinä
laajuudessa, että niiden perusteella voidaan arvioida rakentamiskustannuksia.

Yleissuunnitelman kalliotekniset suunnitelmat sisältävät lisäksi louhinnan tyyppipoik-
kileikkaukset liikennetunneleiden, yhdyskäytävien, kalliokuilujen ja muiden merkittä-
vien kalliotilojen osalta.

Kallioympäristösuunnitelmissa esitetään tehdyt kalliotekniset tutkimukset sekä geologiset tulkinnot. Kallioteknisistä tutkimuksista esitetään vähintään tutkimuspisteen sijainti sekä keskeisin tulos (esim. kalliopinnan korkeusasema). Leikkauspiirustuksissa pyritään esittämään kairausvastukset. Kallionäytekairausten osalta esitetään rikkonaisuuslävistyksen (Ri-luokka ja sen paksuus ja suunta) ja vesimenekikokeiden tulkittu tulos histogrammiesityksenä. Geologisista tulkinnoista esitetään mitattu tai tulkittu kalliopinnan korkeusasema sekä heikkousvyöhykkeet (Ri-luokka ja sen paksuus ja suunta). Suunnitelman seliteosassa tulee kuvata vähintään kalliopinnan korkeusaseman laatimisen periaatteet (mallinnusmenetelmä).

Suunnitelmaselostuksessa kuvataan kalliorakenteiden mitoituksen (ks. Taulukko 11) ja kalliotunnelin vuotovesien hallinnan periaatteet (ks. Taulukko 14).

Suunnitelmien luovutusaineisto sisältää myös tutkimussuunnitelmat niistä tutkimuksista, jotka eivät olleet välttämättömiä yleissuunnitelmavaiheen toteuttamiseksi, mutta parantavat seuraavan vaiheen aloittamisedellytyksiä. Tutkimussuunnitelmissa esitetään peruste tutkimukselle.

7.4.3 Kalliotekniset suunnitelmat tie- ja ratasuunnitelmavaiheessa

Tie- ja ratasuunnitteluvaiheessa tarkennetaan yleissuunnitelmavaiheen suunnitelmia kasvaneen tiedon osalta. Kasvanut tieto käsittelee tyypillisesti tarkentuneita tilatietoja sekä lisääntyneen kalliooperätiedon ja siten parantuneita geologisia tulkintoja. Näiden osalta suunnitelmien sisältö on yleissuunnitelman kaltainen. Laadittaessa suunnitelmapiirustuksia, esitetään tie- ja ratasuunnitelmavaiheessa merkittävästi enemmän poikkileikkauksia tunnelilinjalta. Poikkileikkaukset laaditaan kallioteknisistä erityiskohdista (esim. painanteet, läheiset kalliotilat, suuaukot) sekä tasavälein, joka on noin 5...10 % kalliotunnelin kokonaispituudesta.

Kallion mekaanisten lujitusrakenteiden osalta esitetään tyyppipoikkileikkaukset sekä suunnitelmaratkaisut tyyppisuunnitelmatasolla myös kallioteknistien erityiskohtien läpäisemisestä (esim. merkittävät rikkonaisuudet, ohut kalliokatto, ulkopuoliset kuormat).

Kalliorakenteiden mitoituksesta liitetään rata-/tiesuunnitelmaan erillinen laskentaraaportti (ks. Taulukko 11) ja vuotovesien hallinnan periaatteista erillinen tutkimusraportti ja laskentaraaportti (ks. Taulukko 14).

Kallioympäristöpiirustukset laaditaan kuten yleissuunnitelmavaiheessa.

Suunnitelmien luovutusaineisto sisältää myös tutkimussuunnitelmat niistä tutkimuksista, jotka eivät olleet välttämättömiä tie-/ratasuunnitelmavaiheen toteuttamiseksi, mutta parantavat seuraavan vaiheen aloittamisedellytyksiä. Tutkimussuunnitelmissa esitetään peruste tutkimukselle. Luovutusaineisto sisältää myös seurantamittaus-suunnitelmat vähintään pohjaveden osalta, jotta rakennuttaja voi kerätä mittaustiedoista riittävän aikasarjan ennen rakentamisvaiheen alkamista.

7.4.3.1 Louhintasuunnitelmapiirustukset

Louhintasuunnitelmissa esitetään louhinnan ääriviivat sekä päämitat.

Louhintapohjapiirustuksessa esitetään:

- piirustuksen numero ja nimi yms. kohteen selvittäminen (=nimiö)
- teoreettisen louhinnan sijainti (profiililouhinnat)
- koordinaattiristit ja pohjoisnuoli sekä tarvittaessa paikannuskaavio
- tarvittavat selittävät ja määräävät tekstit
- merkittävät kalliolaatu-, ympäristö- tms. vaikuttavat alueet
- mittalinja/keskilinja ja paalutus
- pituus- ja poikkileikkauslinjat ja leikkauslinjojen tunnukset
- mitoitus (päämitat: pituus, leveys ja korkeus)
- tilan korkeusvaatimukset tai määritellyllä alueella käytettävän profiilin tunnus.

Leikkauspiirustuksessa esitetään:

- piirustuksen numero ja nimi yms. kohteen selvittäminen (=nimiö)
- leikkauksen nimi ja tarvittaessa paikannuskaavio sijainnin selventämiseksi
- tarvittavat selittävät ja määräävät tekstit
- leikkauksen alueella mahdollisesti käytetyn profiilin tunnus
- leikkauslinjaa leikkaavat pituus- ja poikkileikkauslinjat
- muut leikkauslinjan etu- ja takapuolen tilat
- merkittävät kalliolaatu-, ympäristö- tms. vaikuttavat alueet
- leikkauslinjalle mahdollisesti sijoittuvat paalupisteet
- mitoitus (päämitat)
- korkeusviivat/tasoviivat (viivojen väli 5...20 m)
- louhittavan tilan korkeus, kun mahdollisesti poiketaan profiilitunnuksin määritellyltä alueelta
- korkeusasema korkeusviivojen avulla, korkeuslukemat absoluuttisia korkeusjärjestelmän mukaisina korkeuksina
- mahdollinen yläpuolinen rakennuskanta ja kalliolouhinnat
- ympäröivät kalliotilat
- kuilujen leikkauspiirustuksissa lisäksi maanpintatiedot, tuennat (ääriviivoina) sekä periaatteellinen ennakkolujitusuunnitelma.

Louhintaprofiilit laaditaan ns. pääprofiileista ja niistä esitetään seuraavat asiat:

- profiilin tunnus
- teoreettisen louhinnan sijainti ja louhintatoleranssit holvissa, seinillä ja pohjassa
- pysty- ja vaakageometrian sidontatiedot (mittalinja, tsv/kv)
- mittalinja ja tarvittaessa keskilinja (holvin lakipisteen kohdalla)
- päämitat: seinän mitoituskorkeus, kokonaiskorkeus, nuolikorkeus, kokonaisleveys, holvikaaren säde, profiilin poikkipinta-ala.

7.4.3.2 Tiivistysuunnitelmapiirustukset

Ei erillisiä tiivistysuunnitelmapiirustuksia

7.4.3.3 Lujitus suunnitelmapiiirustukset

Tyypilujitus suunnitelmassa esitetään louhintapoikkileikkaus, jossa on:

- piirustuksen numero ja nimi yms. kohteen selvittäminen (=nimiö)
- teoreettisen louhinnan sijainti (profiililouhinnat)
- ruiskubetoni lujituksen tilavarausääriiviivana (yleensä 200 mm teoreettisesta louhintapinnasta), ruiskubetonin rakennetyyppi sisältäen tiedon kerros- paksuudesta ja mahdollisesta vahvistuksesta
- pultit (holvi, seinät [tarvittaessa myös peräseinä peräseinään päättyvissä tunnelitiloissa]): sijainti, jakoväli (k/k) ja viuhkaväli tai ruutu (#), pulttityyppi ja pultin pituus.

Kallion mekaaniset lujitus rakenteet voidaan suunnitelmien esittämisen osalta rinnastaa osittain betonirakenteisiin, jolloin suunnitelmien esittämisen osalta niihin voidaan soveltaa betonirakenteiden suunnittelun ohjeistusta suunnitelmissa esitettävistä asioista. Kallion lujitus suunnitelmissa tulisi esittää:

- kohteen (tunnelin) geotekninen luokka
- SFS-EN 13670 mukainen betonirakenteen toteutusluokka
- betonin lujuusluokka (ominaislujuus)
- kuituvahvisteisen ruiskubetonin energian absorptiokapasiteetti E-luokkana ja lujuusvaatimus mahdolliselle ruiskubetoniverkelle
- muiden materiaalien vaatimukset tarvittaessa
- betonin rasitusluokat (jos ei luokkia tarvita, käytetään rasitusluokkaa Xo)
- rakenteen suunnittelukäyttöikä
- kiviaineksen raekoon ylänimellisraja
- raudoitettussa ruisku- tai valubetonissa betonipeitteen nimellisarvo ja sen sallittu mittapoikkeama
- sementtityyppi, jos siitä on erityisvaatimuksia
- lujuuden kehitys, jos siitä on erityisvaatimuksia (kalliotilojen ruiskubetonirakenteissa käytetään SFS-EN 14487-1 mukaisia varhaislujuusluokkia)
- jälkihoitoon liittyvät vaatimukset (ruiskubetonille By63/2016 mukainen jälkihoitoluokka).

Tyypilujitus suunnitelma laaditaan tyypillisesti kolmelle hankealueelta tulkitulle yleisimmälle kalliolaatuluokalle (esim. kalliolaatu Q=0,1...1, Q=1...4 ja Q>4).

7.4.3.4 Louhinta- ja kallion lujitustöiden määräluettelo

Määräluettelossa ilmoitetaan ainakin ne massat, joita ei voida määrittää suunnitelmista.

7.4.4 Kalliotekniset suunnitelmat rakennussuunnitelmavaiheessa

Rakennussuunnitteluvaiheessa tarkoituksena on laatia rakentamisessa tarvittavien kalliotekniset asiakirjat. Kalliorakennussuunnitelmien kohdalla tämä tarkoittaa, että laaditaan rakentamisen ja hankinnan edellyttämät mitoitettut suunnitelmapiiirustukset, joista käytetään ammattiyhteyksissä puhekielessä termiä *urakkalaskentasuunnitelmat*. Hankintoja palveleva suunnittelukokonaisuus tehdään siinä laajuudessa ja sillä tarkkuudella, että kohteen laajuus, määrät, työtavat ja laatutaso voidaan määrittää valitun urakkamuotoon riittävällä tarkkuudella.

Rakennussuunnitteluvaiheessa laaditaan toteutusta palvelevat suunnitelmat. Hankintoja palvelevat suunnitelmat kehitetään ja täydennetään rakentamisen ja toteutuksen edellyttämiksi mitoitetuiksi suunnitelmiksi ja tuotemäärittelyiksi. Rakennussuunnitteluvaiheessa laaditaan lisäksi rakentamisen ja toteutuksen edellyttämät täydentävät detaljisuunnitelmat. Rakentamisen valmistelun aikana kalliorakennesuunnittelija osallistuu arvioimaan urakoitsijan mahdollisesti esittämien suunnitelmamuutosten toteutuskelpoisuutta ja hyväksyttävyyttä. Suunnittelija osallistuu rakennusaikaisten tavoitteiden määrittämiseen.

Kallioympäristöpiirustukset laaditaan kuten aiemmissa vaiheissa. Kaupallisista syistä piirustuksissa tulisi esittää rakennuttajan kanssa sovitut urakkamuotoon soveltuvat vastuunjaot/-rajaukset geologisiin tulkintoihin ja tutkimusten pistekohtaisuuteen liittyen.

Rakennussuunnitelmavaiheen seurantamittaussuunnitelmat tulee valmistua ajoissa, jotta seurantamittausinstrumentit ehditään asentaa riittävän ajoissa (esim. kallion liikettä seuraavat ekstensometrit suositellaan asennettavaksi jopa 6...12 kk ennen louhintojen aloittamista).

7.4.4.1 Kalliorakennustöiden työselostus

Kalliorakennustöiden työselostus liitetään osaksi kohteen arkkitehdin tai rakennussuunnittelijan laatimaa rakennusselostusta. Kalliorakennustöiden työselostuksessa kuvataan kohteen rakentamisen edellyttämä laatutaso. Nykyaikainen työselostus ei ole selitysmuotoinen (työselitys) ja välttää mahdollisuuksien ottamasta kantaa toteutusmenetelmiin, mikäli se ei halutun laadun takaamiseksi ole välttämätöntä. Otettaessa kantaa toteutusmenetelmiin tulee huomioida rakennuttajan vastuukysymykset työturvallisuuden, laatuvirheiden ja taloudellisten seikkojen osalta.

Liikenneviraston kalliotunneleiden kalliorakennustöiden työselostus laaditaan infrajärjestelmässä ja siihen tulee viitata työselostuksen yleistä-osiossa, jotta järjestelmän maksu- ja mittauserusteet ovat voimassa sellaisenaan.

Laatutason määrittelyssä tulisi tukeutua mahdollisimman paljon InfraRYLin mukaisiin laatuluokituksiin ja käyttää täydentävin osin standardeja sekä muita teknisiä ohjeita (RIL, BY).

Kalliorakennustöiden työselostuksessa esitettävät luokitukset:

- tunnelin geotekninen luokka (Liikenneviraston ohje 30/2014, kohta 2.6.4)
- tunnelin seuraamusluokka (SFS-EN 1990)
- rakentamisen toteutusluokka (SFS-EN 13670)
- tunnelin alueelliset tiiviysluokat (InfraRYL/2018)
- ruiskubetonin tarkastusluokka (InfraRYL/2018).

Kalliorakennustöiden työselostuksessa tulisi esittää tunnelin rakennusgeologisen kartoituksen onnistumisen edellytykset ja niistä urakoitsijalle koituvat vaatimukset, joita on tyypillisesti kartoittajalle turvallisten ja häiriöttömien olosuhteiden luominen, riittävä yleisvalaistus, kartoitettavien tunnelipintojen vesipesu ja paalulukemien maalaminen näkyviin riittävällä tiheydellä.

Suunnitelma-asiakirjoissa määritetään lujittamattomien alueiden tarkat suurimmat sallitut dimensiot.

7.4.4.2 Louhintasuunnitelmapiirustukset rakennussuunnitelmavaiheessa

Louhintasuunnitelmien sisältö on kuten kohdassa 7.4.3.1 on esitetty, mutta mitoitus tarkennetaan päämitoista yksityiskohtaisiin mitoituksiin ja suunnitelmia tulee esittää siinä laajuudessa, että hankinnassa voidaan suunnitelmien perusteella määrittää kaikki louhittavat tilat.

Louhintasuunnitelmiin lisätään lisäksi mahdolliset tarkkuuslouhinta-alueet (tarkkuusvaatimus ja sen laajuus), ennakkolujitukset (pohjapiirustus, leikkaukset), vaiheistukset sekä muut työn vaiheistukseen ja siten kustannuksiin vaikuttavat seikat.

Syvennys-, kanaali- ja kuoppalouhinnoista esitetään mitkä niistä saa louhia profiililouhintojen yhteydessä ja mitkä osat on louhittava erillisenä jälkilouhintana.

7.4.4.3 Tiivistyssuunnitelmapiirustukset

Tiivistyssuunnitelmista esitetään mahdolliset esi-injektoinnin tyyppiviuhkat ja injektointitiedot, joita ovat reikäväli, viuhkojen limitys tunnelin pituussuunnassa, reikien injektointijärjestys, injektoinnin aloituskriteeri viuhkan alueella (Lug), injektointi- ja maksimipaine (MPa), massan valintaan ja vaihtamiseen liittyvät tiedot, lopetuskriteeri sekä injektointia rajoittavat ympäristötekijät sekä kontrollointitoimenpiteet. Injektointimassan osalta esitetään sementin vaatimukset.

Peräseinään päättävistä tunnelitiloista esitetään myös peräseinän esi-injektointitiedot.

Esi-injektointiviuhkoja ei lähtökohtaisesti tule piirtää pohjapiirustukseen, sillä se on useissa urakoissa johtanut erimielisyyksiin niiden vaikutuksista louhinnan rytmitykseen, jolloin rakennuttaja ottaa taloudellisen vastuun urakoitsijan työsuunnittelusta.

Esi-injektointisuunnitelmissa esitetään:

- injektoinnin materiaalitiedot (sementtityyppi, massatyytit)
- injektoinnin aloituskriteeri ja sen edellyttämät tehtävät (esim. tunnustelureiät ja vesimenekkimittaukset)
- injektoinnin lopetuskriteeri
- kontrollointikäytännöt (esim. kontrolliporaus)
- injektointiviuhkan porauksen edellyttämät tiedot rei'istä
- reikäkokeiden määrittely
- injektointipaine
- mansetin tulpan syvyys
- lämpötilan rajoitukset
- injektointijärjestys
- työturvallisuuden edellyttämät maininnat.

7.4.4.4 Lujitusuunnitelmapiirustukset

Tyyppilujitusuunnitelmat kuten kohdassa 7.4.3.3 Rakennussuunnitelmavaiheessa tyyppilujitusuunnitelmat esitetään kaikista louhittavista tiloista.

Ruiskubetonin rakennetyypeistä laaditaan oma rakennetyyppiirustus, josta käy ilmi käytettävät rakennetyypit ja rakennetyyppien osalta niiden kerrospaksuudet, käytettävä vahvistus, betonin lujuus- ja käyttöikävaatimukset, rasitusluokat, maksimiräekoko, betonin vaatimukset sekä kuiduilla vahvistettujen rakenteiden osalta sitkeys-luku E.

Kalliopulttituksista laaditaan tyyppiirustus jokaisesta käytettävästä pulttityypistä. Tyyppiirustuksessa esitetään pultinreiän halkaisija, juotosmassan tiedot (lujuus- ja käyttöikä, rasitusluokka, maksimiräekoko, betonin vaatimukset) sekä mahdolliset pinnoitukset (esim. sinkki, epoksi).

7.4.4.5 Kalliorakennustöiden määräluettelo

Määräluettelossa ilmoitetaan kaikki kalliorakennustöiden määrät käytetyn nimikkeistön (esim. Infra) mukaisesti.

7.4.5 Kalliotekniset suunnitelmat rakentamisvaiheessa

Rakennussuunnitelmavaiheen päätyttyä suunnitelmat tarkennetaan rakentamiskelpoiksi lisäämällä työn yksityiskohtaisen suunnittelun edellyttämiä mitoituksia ja sitomalla suunnitelmat tarkasti paikkatietoon. Paikkatietoon sitomisessa noudatetaan hankekohtaisesti sovittua menettelytapaa, joita voi olla esimerkiksi absoluuttisten koordinaattitietojen esittäminen, yksityiskohtainen mitoitus mittalinjaan, joka toimitetaan laskentatietona tai paikkaan sidottuna 3D-linjana tai louhinnan realistisena tietomallina. Paikallisten koordinaatistojen käyttöä tulisi välttää koordinaatistomuunnosten aiheuttamien virheiden takia.

Kalliorakenteen lopulliset lujitus- ja tiivistyssuunnitelmat voidaan laatia vasta rakennusaikaisen seurannan avulla, jolloin kallio-olosuhteita ml. kalliolaatu seurataan louhituissa tiloissa. Rakentamisvaiheessa kalliorakennesuunnittelija suorittaa viranomaisten määräämät sekä tilaajan kanssa erillistehtävinä sovitut asiantuntijavalvonta- ja selvitystehtävät.

7.4.5.1 Louhinta-, lujitus- ja tiivistyssuunnitelmien päivitys

Kalliotunnelin kalliotekniset suunnitelmat tulee aina tarkastaa todellisia kallio-olosuhteita vastaaviksi ja huomioida louhintatyössä käytettyjen menetelmien vaikutus. Kallio-olosuhteet määritellään huomioiden todellinen kalliolaatu, merkit kallion mahdollisista liikkeistä (esim. seurantamittaukset, mahdolliset vauriot ruiskubetoneissa) sekä vuotovesien määrä ja sijainnit ja päivitetään suunnitelmia vastaavasti. Kallio-olosuhteiden osalta on huomioitava, että kaikki seikat eivät ole paljain silmin nähtävissä, joten tehtyjen havaintojen perusteella tulee päivittää rakennelaskelmat (kalliomekaniikka, injektointi) ja arvioida muutokset suunnitelmiin.

Kalliolaatua seurataan rakennusgeologisen kartoituksen avulla.

Suunnitelmapäivitykset revisioidaan normaalin muutuskäytännön periaatteilla kallioteknisiin suunnitelmiin, jolloin suunnitelmat vastaavat toteutunutta.

7.4.5.2 Suunnittelijan asiantuntijavalvonta rakentamisvaiheessa

Kalliorakennesuunnittelija voi hankekohtaisten sopimusten perusteella tehdä kohteen asiantuntijavalvontaa. Tyypillisiä tehtäviä ovat mm.:

- urakoitsijan laatimien rakentamissuunnitelmien, työpiirustusten sekä työ- ja laatusuunnitelmien sekä työmenetelmäkuvausten tarkastaminen
- vaativien ja erityisasiantuntemusta vaativien kalliorakennustöiden suunnitelmanmukaisuuden tarkastus
- vaativien työkohteiden työaikaisten järjestelyjen ja suorituksenvälvonta (tunnat raiteiden vieressä, vaativat paalutustyöt, pohjaveden alennukset yms.).

Lisäksi kalliorakennesuunnittelija voi osallistua asiantuntijana työmaakokouksiin ja -katselmuksiin.

7.4.5.3 Toteumapiirustukset

Toteumapiirustukset laaditaan rakentamistoimenpiteiden pysyvistä rakenteista. Myös tilapäisistä rakenteista, jotka jätetään paikalleen rakentamistyön päätyttyä (esim. rakennusaikaiset pontit tai tilapäiset perustukset), laaditaan toteumapiirustukset. Piirustuksista tulee ilmetä toteutetun rakennustoimenpiteen yksiselitteinen rakenne, laatu, muoto ja sijainti. Toteumapiirustukset laaditaan yleensä suunnitelma-
piirustuksia tarkistamalla ja täydentämällä.

Tyypillisesti toteumapiirustukset määritellään urakoitsijatehtäväksi.

7.5 Suunnittelun laadunvarmistus

7.5.1 Suunnittelijan laadunvarmistus

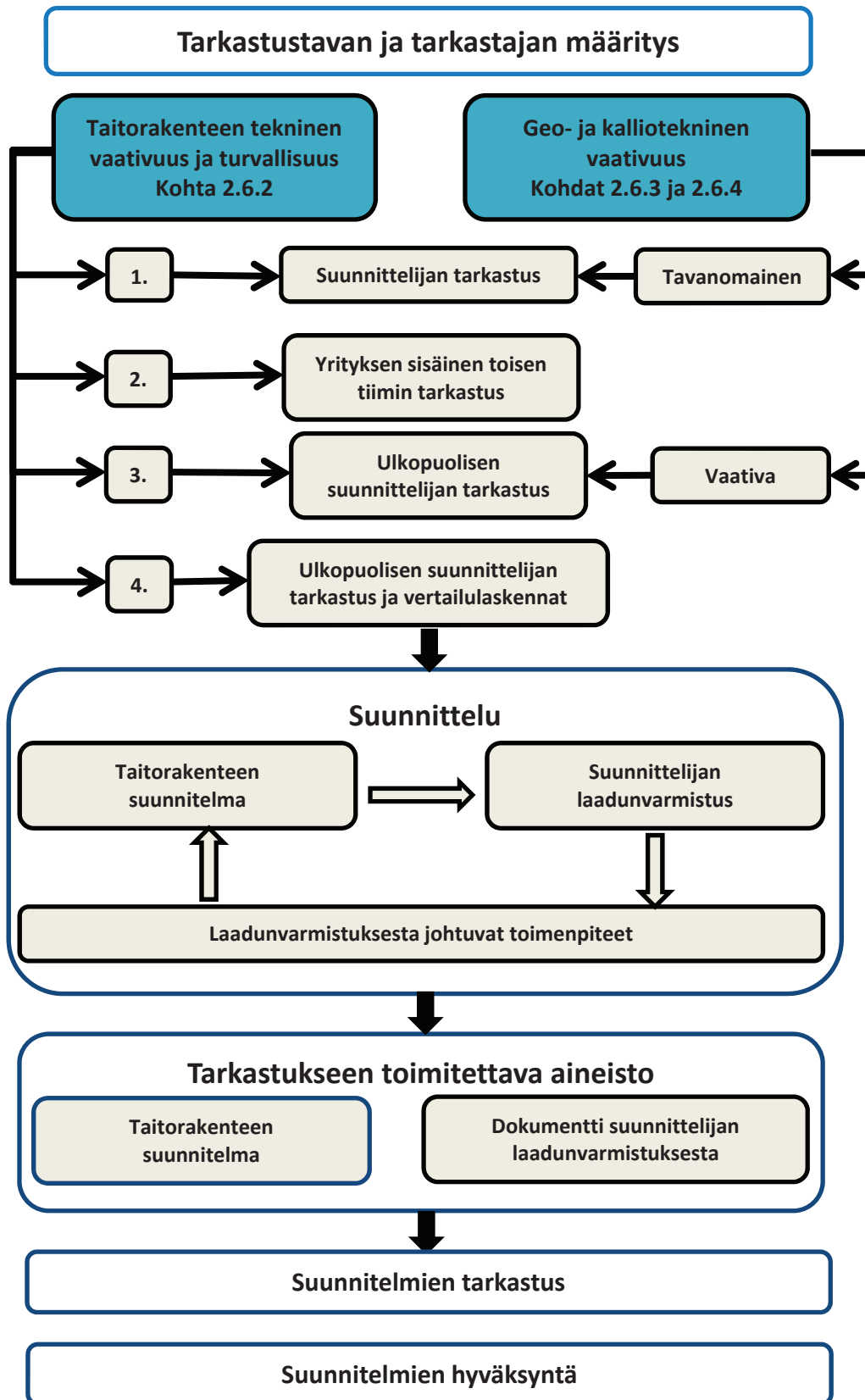
Liikennevirasto edellyttää, että suunnittelija on tehnyt laatimaansa suunnitelmaan laatu- tai toimintajärjestelmänsä mukaisen laadunvarmistuksen ja sen edellyttämät täydennykset ja korjaukset ennen suunnitelman toimittamista tarkastettavaksi (Liikenneviraston ohje 30/2014). Tarkastamiskäytäntö perustuu erityisesti suunnittelijoiden ammattitaitoon ja -ylpeyteen ja siihen, että suunnittelutoimistojen laatu- tai toimintajärjestelmät oman työn laadunvarmistamiseksi ovat ajan tasalla ja niitä kehitetään ja käytetään tehokkaasti. Dokumentti laadunvarmistuksesta pitää toimittaa allekirjoitettuna tarkastettavaksi tarkoitetun suunnitelman yhteydessä. Erityisesti tarkastuksessa tulisi huomioida mitä tarkastusohjeessa kalliotekniikasta (Liikenneviraston ohje 30/2014) on sanottu.

Yleisohjeena muistettakoon, että laatu syntyy tekemällä eikä tarkastamalla.

7.5.2 Liikenneviraston taitorakenteiden tarkastusprosessi

Tunnelin rakennussuunnitelmat tarkastetaan ”Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastusohjeen” (Liikenneviraston ohjeita 30/2014) mukaisesti. Suunnitelman tarkastajalla tulee olla vähintään sama pätevyys kuin kohteen suunnittelijalta vaaditaan.

Liikenneviraston taitorakenteiden tarkastusprosessin määrytyminen on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 27).



Kuva 27.

Taitorakenteiden suunnitelman tarkastus- ja hyväksymisprosessi
(Liikenneviraston ohjeita 30/2014).

7.5.2.1 Suunnitelman tarkastaminen

Kalliorakenneteknisten suunnitelmien tarkastusta on käsitelty Liikenneviraston ohjeessa 34/2017 kohdassa 5.1.5.

Taitorakenteen rakennussuunnitelman tarkastukseen kuuluu suunnittelijan sisäinen laadunvarmistus, varsinainen suunnitelman tarkastus ja hyväksyntä. Tarkastaminen sisältää rakenteen ja siihen liittyvän kalliotekniikan ja muiden tarkastettavien asioiden, esim. vaikutuksen muihin rakenteisiin, kokonaisuuden.

Kallioteknisistä suunnitelmista tarkastetaan kohteesta riippuen:

- pohjatutkimusten ja kalliotutkimusten riittävyys ja tutkimusten raportointi
- mitoituksessa käytetyt kalliotekniset luokitukset, parametrit ja kallion kestävyden ominaisarvot
- kallion tiivistys-, lujitus- ja louhintasuunnitelmat
- kallioluiskan tai kalliotilan stabiliteetin mitoitus
- kalliomekaaniset laskelmat
- pohjavedenhallintasuunnitelma sisältäen ympäristön pohjaveden tarkkailusuunnitelman
- ympäristön värinä- ja siirtymätarkkailusuunnitelma
- kalliorakennustöiden rakennussuunnitelmaselostus ja laatuvaatimukset
- suunnitelmassa esitetyt toimenpiteet kallionlaadun varmistamiseksi (kallioteknisen asiantuntijan katselmoinnit ennen ja jälkeen louhintatöitä).

Laskelmista tarkastetaan, että ne on laadittu voimassaolevan Liikenneviraston niitä koskevan ohjeen mukaisesti. Laskelmien tarkastamiseen liittyvät osaltaan rakenne-mallin ja laskentamenetelmien tarkastus, kuormien ja niiden sijoittelun tarkastus, voimasuureiden ja siirtymien tarkastus ja mitoituksen tarkastus.

7.6 Tietomallipohjainen suunnittelu

Kalliotunnelin kalliotekninen suunnittelu voidaan nykyisin tehdä jo kokonaan tietomallipohjaisesti ja täysin tietomallipohjaisesti toteutettuja tunnelihankkeita on toteutettu jo useita. Viimeisin käynnissä oleva kehitysvaihe on kalliotunnelin tietomallin siirto tunnelilaitteisiin koneohjauksen periaatteilla.

Infrahankkeen tietomallipohjaisessa suunnitteluprosessissa mallinnusta käytetään suunnittelun eri vaiheissa. Mallintamisen laajuus ja tarkkuustaso voivat vaihdella hankkeesta toiseen ja muuttuu tarkemmaksi hankevaiheesta seuraavaan siirryttäessä. Toisaalta tulee huomioida, että myös kallioteknisen suunnittelun laajuus ja tarkkuustaso muuttuu hankevaiheesta toiseen. Lisäksi mallintamisen taso hankkeen sisällä voi vaihdella esimerkiksi eri suunnittelualojen kesken.

Tässä selvityksessä on rajattu kalliotunnelin kalliotekninen tietomallintamisen yksityiskohtaisen spesifiointi aihealueen ulkopuolelle aiheen laajuuden vuoksi. Alle on lisätty voimassa olevaa ohjeistusta. Yleisesti voidaan todeta, että kalliotunnelin kalliotekninen tietomallipohjainen suunnittelu tulisi ohjeistaa nykyistä selkeämmin.

Liikenneviraston tietomallinnuksen ohjeistus:

<https://www.liikennevirasto.fi/palveluntuottajat/inframallit/tietomalli-ohjeistus#.WtjSzGcUl9B>

- Liikenneviraston ohjeita 23/2012, Suunnitelmätiedon hallinta -toimintaohje
- Liikenneviraston ohjeita 12/2017, Tie- ja ratahankkeiden inframalliohje
- Liikenneviraston ohjeita 21/2014, Taitorakenteiden suunnittelun lähtötieto-ohje

Building Smart Finland Infran ohjeet:

- Inframodel-käyttöohje
 - o <http://buildingsmart.fi/infrabim/inframodel/>
- InfraBIM-nimikkeistö:
 - o <http://buildingsmart.fi/infrabim/infrabim-nimikkeisto/>
- Yleiset Inframallivaatimukset:
 - o <http://buildingsmart.fi/infrabim/yiv/>

Helsingin kaupunki:

- Taitorakenteiden tietomallinnusohje
https://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/ohjeet/taitorakenteet_tietomallinnusohje.pdf
- Taitorakenteiden suunnitteluohje
https://www.hel.fi/static/hkr/ohjeita_suunnittelijoille/taitorakenteiden_suunnitteluohje_20170320.pdf

8 Pakkasen huomioiminen kalliotunnelin kallioteknisessä suunnittelussa

8.1 Yleistä

Suurin osa liikennetunneleista on alttiita kylmälle ilmalle ja siten riski pakkasen pääsemisestä tunneliin on huomattava. Pakkanen itsessään ei ole olennaista kalliotunnelin kallioteknisten ratkaisuiden kannalta, mutta yhdessä veden kanssa asiaa tulee tarkastella. Pakkasen pääsyä kalliorakenteisiin voidaan estää erilaisilla rakenneratkaisuilla, joista yleisin on verhoilurakenne, jota on käsitelty Liikenneviraston ohjeessa 34/2017 (Tietunnelin rakennetekniset ohjeet).

Olennaista on tunnistaa pakkasen aiheuttamat vauriomekanismit: *pakkasvaurio* ja *pakkasrapautuminen*. Pakkasvaurio syntyy, kun rakenteen sisältämä tai sen takana oleva vesi jäätyessään laajenee aiheuttaen voimaa, joka mekaanisesti vaurioittaa rakennetta. Pakkasrapautumista tapahtuu, kun rakenne (esim. betoni, kallio) on altis toistuvalla jäätymis-sulamis-syklille. Hyvin tyypillisesti kalliorakentamisessa menee pakkasvaurio ja pakkasrapautuminen sekaisin, jolloin vaurioriskiin varaudutaan väärällä hallintakeinolla. Pakkasenkestävyydellä tarkoitetaan kykyä kestää pakkasrapautumista. Kokemuseräisesti pakkasen kalliorakenteille aiheuttamat vauriot ovat pakkasvaurioita. Tämä tosin on tyypillisempää kallioavoleikkausten kohdalla kuin kalliotunneleissa.

Tässä kappaleessa käsitellään niitä kalliotunnelin kalliorakenteita ja tilanteita, jossa pakkasen pääsee kosketuksiin kalliorakenteen kanssa. Pakkasen ja vesivuotojen aiheuttamat paannejäaongelmat on rajattu selvityksen ulkopuolelle.

8.2 Pakkasen huomioimista koskevat määräykset ja ohjeet

8.2.1 Kansallinen lainsäädäntö

Ei kansallista lainsäädäntöä pakkasen huomioimisesta kalliotunnelin kallioteknisessä suunnittelussa.

8.2.2 Liikenneviraston ohjeet

Ei Liikenneviraston ohjeita pakkasen huomioimisesta kalliotunnelin kallioteknisessä suunnittelussa.

Liikennevirastolla on ohjeita pakkasen vaikutuksen huomioimiseen sillanrakentamisessa (esim. *Siltabetonien P-lukumenettely, Liikenneviraston ohjeita 22/2016*) sekä julkaisuja radan rakentamiseen liittyen (esim. *Ratojen routaongelmat Suomessa, tutkimuksia ja selvityksiä 56/2013* sekä *Routa ja routiminen ratarakenteessa, tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015*). Myös tierakentamisen ohjeet ottavat kantaa teiden routavaurioiden ehkäisyyn suunnittelumenetelmin.

8.2.3 Eurokoodit, kansalliset soveltamisohjeet ja standardit

- SFS-EN 206
 - o määrittelee betonin rasitusluokat jäädytys-sulatus -rasitukselle eli ehkäisemään betonin pakkasrapautumista.
- SFS 7022
 - o kansallinen soveltamisohje standardille 206, sisältää mm. laadunvalvontamenetelmät jäädytys-sulatus -rasitukselle.
- InfraRYL/2018
 - o ottaa kantaa pakkasenkestävyyden toteamiseen kokeilla

8.2.4 Alan yleiset tekniset ohjeet

- By65/2016, Betoninormit 2016
 - o antaa soveltamisohjeita betonin rasitusluokille

8.2.5 Kaupunkien ja kuntien ohjeet

Työssä ei tunnistettu kaupunkien erillisiä ohjeita.

8.2.6 Pohjoismainen ohjeistus

Työssä ei tunnistettu pohjoismaiden erillisiä ohjeita pakkasen huomioimista koskevia määräyksiä.

8.3 Kallio ja pakkanen

Suomalaisen kalliooperän kivilajien vedenjohtavuus on niin pieni, että kiven huokosiin ei pääse vettä ja siten toistuvan jäätymis-sulamis-syklin myötä aiheuttaisi kivelle ns. pakkasrapautumista. Veden kulkiessa kallioraoissa on mahdollista, että pakkanen jäädyttää kallioraossa olevan veden ja saa aikaan voiman, joka siirtää tunnelin kalliolohkoa ja aiheuttaa siten sortuman. Riskiä vähentää kalliomassan hyvä lämmönvarauskyky, jonka johdosta tunnelin kalliomassa on harvoin kauttaaltaan jäässä. Lujittamattomissa kallioavoleikkauksissa tämä on jossain määrin yleistä.

Teoreettinen mahdollisuus kalliotunnelin sortumaan pakkasesta johtuen estetään yleisimmin tehokkaalla tiivistämisellä ja/tai eristerakenneratkaisuilla.

8.4 Kallion mekaaniset lujitusrakenteet ja pakkanen

8.4.1 Kalliopultit

Kalliopultit sijaitsevat kalliomassaan poratussa reiässä, joka on tiivis juotosmassan vaikutuksesta. Näin ollen vesi-pakkanen -yhdistelmä ei pääse vaikuttamaan kalliopultteihin eikä pakkasen aiheuttama vaurioitumisriski ole merkittävä.

8.4.2 Ruiskubetoni

8.4.2.1 Pakkasen aiheuttamat vauriot

Pakkasen betoniin aiheuttamat vauriot ovat joko pakkasrapautumisesta johtuvia vaurioita tai pakkasen aiheuttama mekaaninen vaurio betonirakenteelle.

Betonirakenteeseen voi syntyä *pakkasvaurio*, kun betonin sisältämä vesi jäätyy tai sen takana (esim. kallion ja ruiskubetonin saumassa, kallioraossa tai ruiskubetonisalojassa) oleva vesi jäätyessään laajenee ja aiheuttaa painetta, joka mekaanisesti vaurioittaa ruiskubetonirakennetta ja voi esim. irrottaa palan rakenteesta. Pakkasvauriokohdissa ruiskubetonin ja kallion välinen tartunta on tyypillisesti irronnut.

Pakkasrapautuminen syntyy, kun betoni on altis toistuvalla jäätymis-sulamis-syklille.

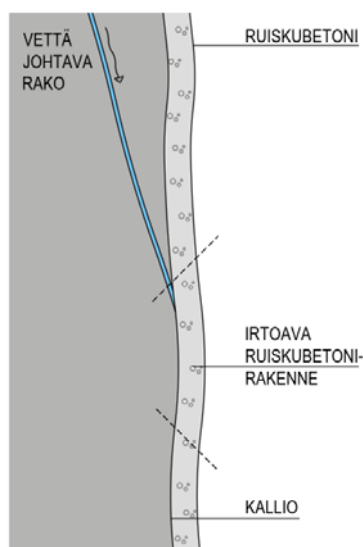
Ruiskubetonin rakenteellisesta huokoisuudesta johtuen ruiskubetonin pakkasrapautuminen ei tyypillisesti ole ongelma rakenteellisesti lujittavalle ruiskubetonille. Pakkasen ruiskubetonirakenteelle aiheuttamat vauriot rajoittuvatkin lähinnä pakkasvaurioihin.

8.4.2.2 Pakkasvaurion hallintatoimet

Pakkasvaurioiden estämisessä pyritään siihen, että jäätymisalttiilla alueella ruiskubetonin ja kallion väliin ei pääse vettä. Ruiskubetoni pysyy erittäin hyvin esimerkiksi tunneleiden suuaukkojen kallioavoleikkauspinoilla, kunhan veden hallinta on suunniteltu. Hallintatoimia ovat mm. seuraavat toimenpiteet:

- tiivistys esi-injektoimalla
- saattolämmitettyjen ruiskubetonisalojien käyttö
- lämmöneristeratkaisut
- suuaukoilla vedenohjauspalkit
- vedenohjausreiät
- muut kuivatus- ja vedenohjausratkaisut.

Jos pakkasvaurion riskiä ei voida välttää, on käytetty ruiskubetonin sitkeys- ja lujuusominaisuuksien vahvistamista teräsverkotusta ja aluslevyllisiä kalliopultteja.



Kuva 28. Jäätävän veden vaikutus ruiskubetonirakenteessa.



Kuva 29. *Pakkasen vaurioittama kallion ruiskubetonirakenne. Vauriot ovat selkeitä pakkasvaurioita, joita voi ehkäistä yllä luetelluilla toimenpiteillä (vas. Tutkimuksia ja selvityksiä 32/2014, oik. Ohje 20/2016 [luonnos], Liikennevirasto).*

8.4.2.3 Pakkasrapautumisen hallintatoimet

Tyypillisesti valubetonissa pakkasrapautumista hallitaan käyttämällä huokoistettua pakkasenkestävää betonia, suunnittelemalla ja toteuttamalla rakennetekniset yksityiskohdat oikein ja suojaamalla rakenne kosteudelta. Ruiskubetoni taasen on rakentamistapansa johdosta jo itsessään rakenteellisesti huokoista, jolloin erillisten huokostimien lisäys massaansa on todettu tarpeettomaksi kalliorakentamisessa, mutta myös sen takia, että huokostimen massaansa synnyttämät ilmakuplat hajoavat ruiskutettaessa ruiskubetonointiprosessin seurauksena. Rakenteellisesta huokoisuudesta johtuen ruiskubetoni itsessään kestää hyvin pakkasta, vaikka ruiskubetonipinta olisikin pakkaselle alttiina. Tästä rakenteellisesta huokoisuudesta johtuen suomalaisissa kalliotunneleissa ei käytännössä näy ruiskubetonin pakkasrapaumaa, vaan pakkasen aiheuttamat haitat ovat pääsääntöisesti pakkasvaurioita (ks. 8.4.2.3). Toisin sanoen pakkasrapautumiseen ei tarvitse erikseen varautua ruiskubetonoinnissa, mutta ruiskubetonille voidaan erikoistapauksissa soveltaa XF-rasitusluokkia standardin SFS-EN 206 -mukaisesti.

8.4.2.4 Ruiskubetonin pakkasenkestävyyden toteaminen

Ruiskubetonin pakkasenkestävyyden kokeet mittaavat pakkasrapaumaa, vaikka kokemusperäisesti pakkasen ruiskubetonirakenteille aiheuttamat vauriot ovat pakkasvaurioita. Ruiskubetonin pakkasvaurioiden osalta pakkasenkestävyyttä ei voi todeta, vaan on todettava kallion ja ruiskubetonikerroksen välisen kontaktin tiiveys.

Ruiskubetonistandardit SFS-EN 14487 eivät käsittele ruiskubetonin pakkasenkestävyyttä eikä ruiskubetonin pakkasenkestävyyden toteamiselle ei ole omaa ohjeistusta, vaan joissakin hankkeissa on sovellettu valubetonille tarkoitetuissa menetelmissä, joita on kuvattu standardin SFS-EN 206 kansallisen soveltamisohjeen SFS 7022 liitteessä A. Em. liitteen menetelmät ovat 1) huokosjako 2) jäädytys-sulatuskoe ja 3) laattakoe. Em. menetelmät on tarkoitettu kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden toteamiseksi ja kokeet tehdään joko ruiskutetusta rakenteesta tai ruiskuttamalla tehdyistä koelaatoista otetuista koekappaleista. Rakenteesta otetun koekappaleen tulee olla yhtenäinen eikä sen tule sisältää useamman ruiskutuskerroksen välistä saumaa, jotta vältetään rajapintailmiöitä tulosten tulkinnan virhelähteenä.

SFS 7022 liitteen A menetelmien soveltamisessa ruiskubetonille tulisi huomioida seuraavat seikat:

- huokosjako: ruiskubetoniin ei sovelleta ympäristöluokkien mukaista ilmapitoisuuden minimimäärää (SFS-EN 14487-1 kohta 4.2 sekä InfraRYL/2018 kohta 15300.1.1), joten huokosjaon mittaaminen ei sovellu menetelmäksi
- jäädytys-sulatuskoe on menetelmänä ruiskubetonille soveltuva. Kokeeseen tarvitaan lieriöitä (Ø 75 mm), joiden pituus on yli 75 mm (päiden oikaisu) ja lierikokeen yksikköhinta on tyypillisesti merkittävä, joten koemäärä tulisi valita huolella kohteen laajuuden mukaan
- laattakoe ei sovellu ruiskubetonille sen rakenteellisten ominaisuuksien takia.

8.5 Ruiskubetonoinnin salaojat

Ruiskubetonoinnin salaojissa virtaava vesi jäätyessään laajenee ja voi vaurioittaa ruiskubetonisalaojan rakenteen osia tai kokonaan. Tämän ehkäisykeinona pakkaselle alttiilla olevilla alueilla (esim. suuaukkojen läheisyydessä ja kuiluissa) käytetään saatto-lämmitystä (ks. kohta 5.6.2).

9 Viime vuosina toteutetut liikennetunnelit ja niistä saatuja suunnittelukokemuksia

Tähän lukuun on kerätty sellaisia kallioteknisen suunnittelun kokemuksia aiemmista 2010-luvulla rakennetuista liikennetunnelihankkeista, jotka on koettu tarpeelliseksi kerätä tiivistetyssä muodossa tähän selvitystyöhön. Selvitystyötä varten haastateltiin Valtatien VT7 (E18) tunnelien sekä Valtatie VT12 Rantaväylän Rantatunnelin suunnitteluun osallistuneita suunnittelijoita (Mikkola, Koponen, Hynynen ja Hollmén).

9.1 Valtatie VT 12

9.1.1 Tampereen Rantaväylä, Rantatunneli

Tampereen Rantaväylä toteutettiin allianssimallilla ja se sai paljon julkisuutta siitä, että tunnelin käyttöönotto tapahtui edellä aikataulua ja sen kustannukset eivät ylittäneet allianssin tavoitekustannuksia.

Rantaväylän tunneli (2,3 km – tunneleita yhteensä 5 km) valmistui 2016 ja se on sekä Suomen pisin maantietunneli että Suomen pisin henkilöliikennetunneli. Rantatunnelin rakentaminen alkoi syksyllä 2013 ja tunnelilouhinta päättyi kesäkuussa 2015. Tunneli avattiin liikenteelle 15.11.2016.

Rantatunnelin rakentamisen aikana tehtiin lukuisia innovaatioita. Kalliotekniikan kannalta keskeisimmät kustannuksiin, toteutukseen tai työn laatuun vaikuttaneita seikkoja oli seuraavat:

- ruiskubetonoinnin sitkeysluokkana käytettiin E700, sillä E1000-luokan käytölle ei löydetty perustelua
- tunneliin ei lähtökohtaisesti asennettu salaojia, sillä tietunneliin rakennettiin eristerakenne
- tunnelissa toteutettiin pohjaveden painekorkeuden työnaikaista mittausta tunnelista käsin poraamalla yläkätisiä reikiä lähelle kallion pintaa ja asentamalla reikiin painemittareita
- ruiskubetonin lattialiittymä jätettiin niin ylös kuin se oli mahdollista ts. aivan törmäysrakenteen täyttösepin yläpinnan rajaan
- kaikki kalliopultit olivat jälki-injektoitavia paisuntakuoriankkuripultteja, jolloin niiden lujittava vaikutus saatiin aikaiseksi heti ja lisäksi ne oli mahdollista juottaa paineella injektoiden, jolloin pultin asentamisella oli myös jälki-injektointivaikutus
- ruiskubetonin vahvistamiseen käytettiin polymeerikuituja
- ruiskubetonin tartuntalujuuskokeet korvattiin koputuskokeilla
- välitön ruiskubetoni luettiin osaksi lopullista ruiskubetonirakennetta, kunhan sen lujuus oli ylittänyt vaaditun (RIL, Rakentamisen tärinät) ennen louhintaräjähdytystä ja kunhan sitä jälkihoidettiin kuten muutakin ruiskubetonirakennetta.
- välittömät lujitukset sisällytettiin lujitusten tyyppisuunnitelmapiirustuksiin, sillä välittömän lujitustarpeen arvioitiin olevan kalliolaaturiippuvaista
- kohteessa oli yksi kalliorakennesuunnittelija päivittäin työmaalla hankkeen käytävissä, mikä mahdollisti nopeidenkin ratkaisujen tekemisen

- tunneli kartoitettiin systemaattisesti yötyönä
 - o projektin työmaalla oli jatkuvasti töissä 2 rakennusgeologia, jotka työskentelivät pääsääntöisesti klo 18-02 ja 00-08 työvuoroissa. Tällä varmistettiin, että aamuun mennessä oli kartoitettu edellisenä päivänä louhitut perät
 - o geologeilla oli valmius määrittää käytettävä lujitusratkaisu, sillä suunnittelijat olivat laatineet ennakolta sovittuihin kallio-olosuhteisiin tyyppilujitusratkaisut, jotka sisälsivät myös välittömän lujitustarpeen (rb+pulttit). Suunnittelija tarkasti geologin määrittämän lujitusratkaisun työpäivän ensimmäisenä työnään
 - o tunnelitilojen rakennusgeologinen kartoitus tallennettiin jo tunnelissa tunnelikäyttöön suunnitellulla tabletilla kartoituslomakkeelle, joka tallentaa tiedon Surpac-tietokannan kanssa yhtenevään formaattiin. Tämän jälkeen geologinen malli voitiin päivittää toteuman perusteella ja tarvittaessa laatia ajantasaista tulkintoja tulevast
 - o lyhyet katkot, 1-2 m, olivat hankalia kartoittaa, sillä päärakosuuntien hahmottaminen niistä oli ajoittain vaikeaa, jos edelliset katkot oli jo ruisku-betonoitu.
 - Jokaisen katkon kartoittaminen yksittäin heti louhinnan jälkeen ei välttämättä ole paras lopputuloksen kannalta, sillä se on saattanut johtaa kalliolaatuluokan määrittämisessä liian varovaiseen arvioon kalliolaadusta ja siten mahdolliseen ylilujittamiseen, koska päärakosuunta on saatettu määrittää liikaa. Projektin loppudokumentation yhteydessä tehdyssä aineiston tilastollisessa käsittelyssä havaittiin alueella olevan kolme päärakosuuntaa sekä neljäs satunnainen rakosuunta, jonka suunta vaihteli alueittain. Kuitenkin noin neljännesosassa kartoituslomakkeissa oli kartoitettu J_n -arvoksi 15. Tämä pääteltiin johtuneen liian lyhyistä kartoitusosuuksista.
- kohteessa tehtiin ennakkotutkimuksia kallioperän arseenipitoisuudesta sekä sydännäytteistä että porakonekairausten porasojasta, sillä kohde sijaitsi Tampereen liuskekivijaksolla, jossa on tunnistettu kohonneita arseenipitoisuuksia
- itäpään ohuen kalliokaton alue (rakennuksen alla) lävistettiin tiheästi ennakkoon asennettujen vaakapulttitusten avulla
- kohdealueella oli tunnistettu paisuvahilaisten savien riski. Rakosavia tarkkailtiin tehostetusti koko työn ajan ja aina epäilysten herätessä savesta otettiin näyte laboratorion tutkittavaksi
 - o kaikille näytteille tehtiin vapaan paisumisen koe. Näitä kokeita tehtiin yhteensä lähes 50 kappaletta
 - o vapaan paisumisen ylittäessä aktiivisen savien määrityksen (tilavuuden muutos >120 %) tehtiin näytteelle paisuntapainekoe. Näitä kokeita tehtiin yhteensä 8 kappaletta.
 - o suunnittelulla oli jatkuva valmius arvioida lisälujitustarve, mikäli paisuntapaine olisi koettu vaikuttavan suunniteltuihin lujitusratkaisuihin. Tulosten perusteella lisälujituksiin ei kuitenkaan ollut tarvetta
- hankkeessa tehtyjen ennakkotutkimusten määrä oli kattava. Kalliotutkimuksilla selvitettiin kalliopinnan korkeusasemaa, kalliolaatua, kalliomateriaalin ominaisuuksia (laboratoriokokeet), kallion jännitystilaa, kalliopohjaveden laatua, pintaveden laatua, olemassa olevien kalliotilojen sijaintien laserkeilausmittauksia sekä pintavaaituksia.

9.2 VT7 (E18) tunnelit, Helsinki-Vaalimaa

E18-tunnelien suunnittelijat nostivat yhdeksi tärkeimmäksi suunnitteluasiaksi kalliotunnelin vesivuotojen hallinnan. Liikenneviraston liikennetunneleissa vesivuotoja ei sallita. Vesivuodot tippuvat tielle aiheuttaen liukkaita ja toinen ongelma on, että vesivuodot rapauttavat lujitusrakennetta.

Toisena tärkeänä asiana pidettiin kalliotunnelien suuaukkojen suunnittelua. On tärkeää suunnitella tunnelien suuaukot siten, että estetään pakkasen johtuminen kalliorakenteeseen. Suuaukkorakenteen oikealla suunnittelulla estetään myös se, että kallion ja verhousrakenteen välitila ei pääse jäätymään.

E18-tunneleiden yhtenä oppina todettiin yhteisesti, että jos mahdollista, niin suuaukon sijainnin reunaehdoissa pitää jättää väljyyttä, jotta voidaan reagoida louhintatyön aikana havaittuun kalliolaatuun ja kalliopintatietoihin. E18-tunneleista suunnittelijat totesivat, että vaikka kalliotutkimuksia oli tehty, niitä ei tehty riittävästi. Kalliotunnelin suuaukon kohdalta on todella harvoin olemassa täydelliset tiedot kalliopinnan korkeusasemasta ja kalliolaadusta. Usein todellinen kallion laatu ja kalliopinnan korkeusasema paljastuvat vasta avolouhinnan yhteydessä. Suunnittelijoiden mielestä kalliotutkimuksia ei olisi ollut kuitenkaan tarpeen tehdä lisää/enempää, vaan todellinen tilanne selviää työn aikana. E18-tunneleiden osalta kalliotunnelin suuaukkojen läheisyydessä ei ollut rakenteita tai rakennuksia, joten suuaukon sijaintia oli mahdollista hieman siirtää työn aikana. Kokonaistaloudellisesti on kuitenkin edullisempaa, jos kalliotunnelin suuaukolla on hieman väljyyttä suuaukon sijainnin suhteen, jotta suuaukon sijaintia voidaan muuttaa (tämä pitäisi huomioida jo tietunnelisuunnitteluvaiheessa).

E18-tunneleissa saatiin kalliotunnelin tietomallipohjaisella suunnittelulla merkittäviä hyötyjä yhteensovituksen näkökulmasta, joten tietomallipohjaista suunnittelua suositellaan jatkossakin. Tietomallintamasta tulisi hyödyntää entistä laajemmin kaikissa suunnitteluvaiheissa ja kaikkien osapuolten kesken.

9.2.1 E18 Vaalimaan tunneli

Vaalimaan tunneli on 225 m pitkä ja se sijaitsee Hamina–Vaalimaa välisellä moottoritiellä Vaalimaalla. Tunneli läpäisee Rasa-ahonmäen kalliomäen. Tieosuus avattiin liikenteelle keuhällä 2018. Tunneli koostuu kahdesta vierekkäisestä tunnelista, kummallekin ajosuunnalle on oma ajoneuvotunneli. Tämän tunnelin suunnittelussa pyrittiin hyödyntämään Markkinamäen ja Kolsilan tunnelin suunnittelussa saadut opit. Vaalimaan tunneliin suuaukoille mm. ohjelmoitiin kalliotutkimuksia enemmän kuin edellisille tunneleille (Markkinämäki, Kolsila), mutta silti tässäkin tunnelissa jouduttiin tunnelin suuaukkoa siirtämään.

Vaalimaan kalliotunneli tehtiin tietomallintamalla. Vaalimaan tietunneli oli ensimmäinen kalliotunneli, jonka suunnittelu tehtiin kokonaan tietomallintamalla. Kaikki tunnustelureikien (esi-injektointireiät ja tunnustelureiät) tiedotkin syötettiin tietomalliin ja näin saatiin arvokasta tietoa suunnitteluun ja pystyttiin optimoimaan suuaukon paikka.

9.2.2 E18 Markkinamäen tunneli

Markkinamäen tunneli on 499 m pitkä ja se valmistui syksyllä 2014. Markkinamäen tunneli sijaitsee Valtatie 7:llä Loviisassa. Tunneli koostuu kahdesta vierekkäisestä tunnelista, kummallekin ajosuunnalle on oma ajoneuvotunneli.

Tunneli suuaukon louhinta suoritettiin huolellisesti eikä kallio rikkoontunut kuten ”normaalissa” louhinnassa. Näin saatiin vähennettyä vesivuotoja. Suuaukolla otsapinnan pystyreivät tehtiin ns. köyhän miehen irtiporauksella ts. otsapinnan reiät porattiin vieriviereen ja reikäväli (k/k) oli enimmillään 2 x reiän halkaisija. Tunnelin suuaukon avolouhintaosuudella kallioseinäpinnat louhittiin toleranssilla T200 suuaukosta 20 metrin päähän. Tunnelin ensimmäisten 5 metrin osalta tunnelin holvi- ja seinäpinoilla louhinta tehtiin tarkkuuslouhintana (T200). Tunnelin suuaukon päälle tehtiin vedenohjauspalkki, jolla estettiin, että vettä ei päässyt valumaan tunnelin otsapinnalle. Näin saatiin estettyä paannejään muodostuminen ja otsapinnan rapautuminen.

Vedenohjauspalkkien tarkemmat suunnitelmat laadittiin vasta maastokäynnin jälkeen, jotta voitiin huomioida kaikki kalliopinnan pienipiirteiset vaihtelut.

9.2.3 E18 Kolsilan tunneli

Kolsilan tunneli on 150 m pitkä ja se koostuu kahdesta vierekkäisestä tunnelista, kummallekin ajosuunnalle on oma ajoneuvotunneli. Kolsilan tunneli avattiin liikenteelle 2014. Kolsilan tunneli sijaitsee Valtatie 7:llä Haminassa. Yhteinen oppi Kolsilan, Markkinamäen ja Vaalimaan tunneleista on, että louhinnan ennakkopalkki kannattaa tehdä. Sillä estetään kallion ylimääräinen ryöstyminen ja helpotetaan betonitunnelin ja kalliotunnelin liitoksen tekemistä.

10 Tunneleiden huoltokirja

Uusille kalliotunneille on laadittava huoltokirja ennen käyttöönottoa.

Tunnelikohtaiseen huoltokirjaan kootaan seuraavat asiakirjat:

- kunnossapitäjän ja vastuuhenkilöiden yhteystiedot
- rautatietunnelin suunnitelmat tarpeellisessa laajuudessa
- tunnelin laitteiden ja asennusten toimintakaaviot sekä tekniset tiedot
- poikkeustilanneohjeet
- tunnelin laitteiden ja asennusten käyttö-, huolto-, kunnossapito- ja tarkastusohjeet sekä määräaikaishuoltokortit, joissa tulee määritellä huoltovälit ja -toimenpiteet
- kunnossapitosuunnitelma, jossa esitetään rataverkon haltijan hyväksymät kunnossa-pitotoimet sekä raja-arvot, joiden ylittyessä on ryhdyttävä kunnossapidon toimenpiteisiin.
- tunnelin ja sen laitteiden käyttöehdot ja rajoitukset
- jatkuvasti päivittyvä yhteenveto tehdyistä tarkastuksista ja niissä tehdyistä havainnoista
- kelpoisuuskirja.

Tunnelin haltija (Liikennevirasto) vastaa huoltokirjan laatimisesta ja päivittämisestä.

Kalliorakennuskohteissa mm. pohjaveden tarkkailua, painumatarkkailua ja kalliomekaanista seuranta jatketaan vielä louhintatöiden päätyttyä, tyypillisesti vähintään vuosi tunnelin käyttöönoton jälkeen.

Käyttöönottovaiheen aikana tilaaja tai käyttäjä perehdytetään kalliorakennuksen käyttöön. Kalliorakennuksen käytön aikana tehtävillä mittauksilla selvitetään rakentamisen pitkäaikaisvaikutuksia sekä rakentamisesta kallioon ja ympäristöön aiheutuneita muutoksia. Saatujen tulosten perusteella saadaan arvokasta tietoa myöhempien kalliorakennushankkeiden suunnittelua varten.

11 Arkistointi ja rekisterien päivitys

11.1 Taitorakennerekisteri

Kaikki tunneleihin liittyvä uusi tai muuttunut aineisto toimitetaan Liikenneviraston taito-rakennerekisterin ylläpitäjälle voimassaolevan Taitorakenteiden tiedon käsittely-ohjeen (ohje tekeillä) mukaisesti.

Rekisteristä voidaan tulostaa tiedot rautatietunneleiden kunnon seurantaan ja toimenpiteiden ennakointia varten. Rekisterin tiedot omistaa Liikennevirasto.

11.1.1 Dokumentoinnin yleiset vaatimukset

Dokumentointi tehdään Liikenneviraston Rautateiden osajärjestelmien käyttöönotto-ohjeen mukaan.

Lähteet

Axelsson, M. 2006b. Strength Criteria on Grouting Agents for Hard Rock - Laboratory studies performed on gelling liquid and cementitious grout. Licentiate Thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

Broms, B., Heiner, A. 1979. Förstärkningen av lezoner i berganläggningar, Byggsforskningens Rapport R130:1979, Tukholma

Cesano, D. 2001. Water leakage into underground construction in fractured rock. Väitöskirja. Royal Institute of Technology, Tukholma, Ruotsi.

Eloranta, E. 2007. Geofysiikan kenttäteoria. STUK, Säteilyturvakeskus, Helsinki, Suomi. Raportti STUK-A198.

Eklund, D. 2005. Penetrability due to filtration tendency of cement based grouts. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

Eklund, D. Stille, H. 2007. Penetrability due to filtration tendency of cement based grouts. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol 23, pp. 389-398

Eriksson, M. Stille, H. 2005. Cementinjektering i hårt berg. Swedish Rock Engineering Research, Tukholma, Ruotsi. Raportti K22

Funehag, J. 2007. Grouting of Fractured Rock with Silica Sol - Grouting design based on penetration length. Doctoral Thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, Ruotsi

Funehag, J. 2013. Guide to grouting with silica sol – for sealing in hard rock. Stiftelsen bergteknisk forskning. BeFo – Rock Engineering Research Foundation. Befo Report 118. Tukholma, Ruotsi.

Gardemeister, R., Johansson, S., Korhonen, P., Patrikainen, P., Tuisku, T., Vähäsarja, P. 1976. Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen. Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 25.

Goodman R.E., Shi, G. 1985. Block Theory and its Application to Rock Engineering. Prentice-Hall Inc., New Jersey 1985. 338 s.

Gustafson, G., Fransson, Å., Axelsson, M., Funehag, J., 2006. Grouting strategies – Requirements on grout strength and rheology. Division of GeoEngineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Gustafson G., Fransson Å., Axelsson M., Funehag J. 2007. Grouting strategies – requirements on grout strength and rheology

Gustafson, G., Fransson, Å., Axelsson, M., Funebag, J., 2006. Grouting strategies – Requirements on grout strength and rheology. Division of GeoEngineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Gustafson, G., Stille, H. 1996. Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol 11, No 3, pp. 325-332

Gustafson, G. Stille, H. 2005. Stop Criteria for Cement Grouting. *Felsbau: Zeitschrift für Geomechanik und Ingenieurgeologie im Bauwesen und Bergbau*. Vol 23, No 3, pp. 62-68.

Gustafson, G. 1986. Geohydrologiska undersökningar i berg. BeFo – Stiftelsen Bergteknisk Forskning. Tukholma, Ruotsi.

Gustafson, G. 2012. Hydrogeology for Rock Engineers. BeFo – Rock Engineering Research Foundation. Tukholma, Ruotsi.

Helsingin Kaupunkisuunnitteluvirasto. 2006. Maanalaisten toimintojen yleinen turvallisuusselvitys.

Hoek, E., Bray, J., 1981. *Rock Slope Engineering* – revised third edition. The institute of Mining and Metallurgy, Lontoo, Iso-Britannia.

Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden F. 1993. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Saatavissa (31.5.2018): https://www.mirarco.org/wp-content/uploads/mirarco_books/Support_of_Underground_Excavations_in_Hard_Rock.pdf

Hollmén, K. 2007. R20 Programme: Development of Grouting Technique – Stop criteria and field tests. Posiva Oy, Olkiluoto, Finland. Working Report 2007-101

Hollmén, K., Sievänen, U., Tolppanen, P. 2007. Onkalossa tehdyt injektointikokeet. Kallio-mekaniikan päivä 2007, seminaarijulkaisu. The Finnish National Group of ISRM

Houlsby, A. 1976. Routine interpretation of the Lugeon water-test. *Quarterly Journal Of Engineering Geology*. Vol 9, pp. 303-313.

Houlsby, A. 1990. *Construction and Design of Cement Grouting*. John Wiley and Sons, New York, The United States of America.

Kasenow, M. 2006. *Aquifer Test Data: Evaluation and Analysis*.

Lombardi, G. 1985. The role of cohesion in cement grouting of rock. In *Proceedings of Quinzie`me Congre`s des Grands Barrages*, Lausanne, Switzerland, pp. 235-261.

Lombardi, G., Deere, D. 1993. Grouting Design and Control Using the GIN principle. *Water and Power and Dam Constructions*, June 1993, pp. 15-22.

Maa- ja kalliorakennus. RIL 98. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1976.

Matikainen, R., Särkkä, P., Johansson, E. 1982. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja. Suomen akatemia. Vuorimiesyhdistys - Bergsmannaföreningen ry.

MBT, 2001. Procure of Master Builders Technology. (tarkastamaton referenssi lähteestä Tolppanen Syrjänen 2003)

Mikkola, J. 2005. Nykyaikainen kalliomekaaninen suunnittelu kalliorakennushankkeen riskienhallinnassa. Rakentajainkalenteri 2005.
<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK050301.pdf> (viitattu 9.3.2018)

NGI. 2015. Using the Q-system, Rock mass classification and support design. Norwegian Geotechnical Institute.

Niiranen, T. 2015. Pro gradu -tutkielma. Kallion tunnistaminen ja luokitus SFS-EN ISO 14689 -standardin mukaisesti. Helsingin yliopisto, Geotieteiden ja maantieteen laitos.

Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk - NFF. 2010. Håndbok nr. 6. Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg.

Norwegian Concrete Association. 2011. Sprayed Concrete for Rock Support.

NTH, 1978. Fri svelling. Geologisk institutt, NTH. Ingeniørgeologisk laboratorium.

Peltoniemi, M. 1988. Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo.

RIL 154-1 Tunneli- ja kalliorakennus I. Suomen rakennusinsinöörien liitto. 1987.

RIL 154-2 Tunneli ja kalliorakennus II. Suomen rakennusinsinöörien liitto. 1987.

Statens vegvesen. 2004. Publikasjon nr. 104. Berginjeksjon i praksis. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen. 2016. Håndbok N500 Veggtunneler. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen. 2014. Håndbok V224 Fjellbolting. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen. 2016. Håndbok V520 Tunnelveiledning. Vegdirektoratet.

Syrjänen, P. Antikainen, J. Hakala, M. Mikkola, J., Mononen, S., Sahalahti, K. 2008. Kalliomekaaninen suunnittelu. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirjan liite DVD, luku 4. Kaivannaisteollisuus ry. Opetushallitus. Helsinki.

Trafikverket. 2016. TDOK 2016:0231 Krav Tunnelbyggande. Version 1.0.

Trafikverket. 2016. TDOK 2016:0232 Råd Tunnelbyggande. Version 1.0.

Valtanen, U. 2002. *Kalliorakennuskohteen mitoituslaskentamenetelmät*. Opinnäytetyö. Teknillinen korkeakoulu, Materiaali- ja kalliotekniikan osasto, Espoo.

Vägverket. 2000. Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser.

Widman, R. 1996. International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting. Int. J. Rock Mech. Min.

Tiedonannot:

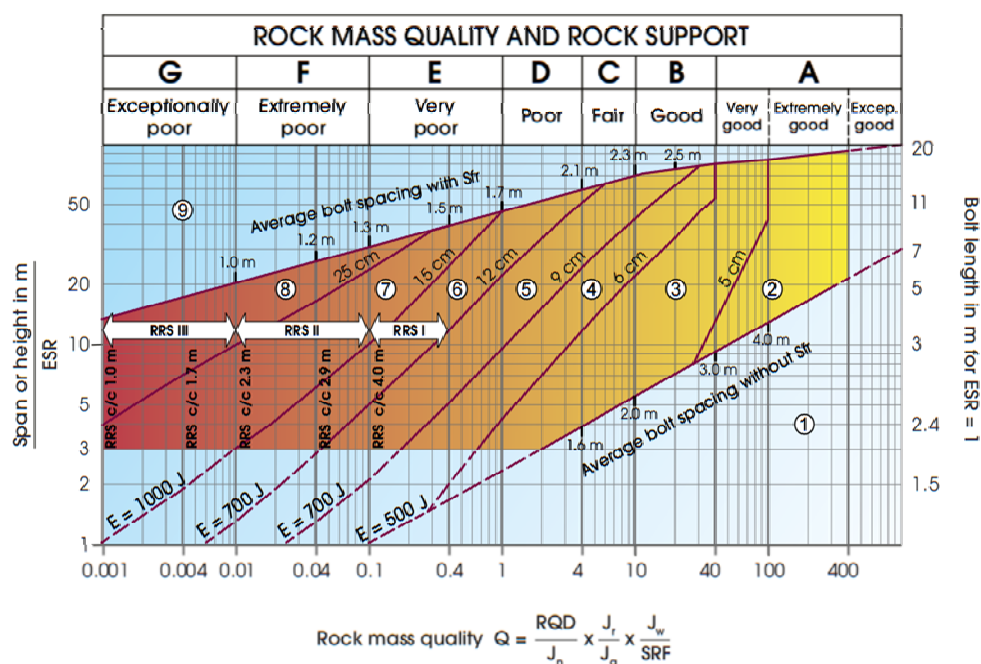
- Hakala, M. 2018. Kirjallinen tiedonanto
- Sipola, V. 2018. Suullinen tiedonanto
- Ström, J. 2018. Suullinen tiedonanto

Esimerkki Q-lujitusjärjestelmän käyttämisestä

Norjan geoteknisen instituutin (NGI) julkaisema Q-metodi sisältää kallioluokituksen ja siihen perustuvan taulukkomitoituksen. Menetelmän viimeisin versio on esitetty julkaisussa ”Using the Q-system – rock mass classification and support design, 2015”. Sisäasiainministeriön asetuksen 506/2011 mukaan Q-luokituksen määrittelytapa on kansainvälisesti hyväksytty menetelmä.

Huomaa (ks.

Kuva 1-31), että taulukkomitoituksen pultitus on määritetty nimellishalkaisijaltaan (Ø) 20 mm:n pultteille.



Kuva 1-30. Q-systeemin lujitussuositusten nomogrammi.

Support categories

- ① Unsupported or spot bolting
- ② Spot bolting, **SB**
- ③ Systematic bolting, fibre reinforced sprayed concrete, 5-6 cm, **B+Sfr**
- ④ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
- ⑤ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700)+B**
- ⑥ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 12-15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E700)+RRS I+B**
- ⑦ Fibre reinforced sprayed concrete >15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
- ⑧ Cast concrete lining, **CCA** or **Sfr (E1000)+RRS III+B**
- ⑨ Special evaluation

Bolts spacing is mainly based on Ø20 mm

E = Energy absorption in fibre reinforced sprayed concrete

ESR = Excavation Support Ratio

Areas with dashed lines have no empirical data

RRS - spacing related to Q-value

I S130/6 Ø16 - Ø20 (span 10m)

D40/6+2 Ø16-20 (span 20m)

II S135/6 Ø16-20 (span 5m)

D45/6+2 Ø16-20 (span 10m)

D55/6+4 Ø20 (span 20m)

III D40/6+4 Ø16-20 (span 5m)

D55/6+4 Ø20 (span 10m)

Special evaluation (span 20m)

S130/6 = Single layer of 6 rebars,
30 cm thickness of sprayed concrete

D = Double layer of rebars

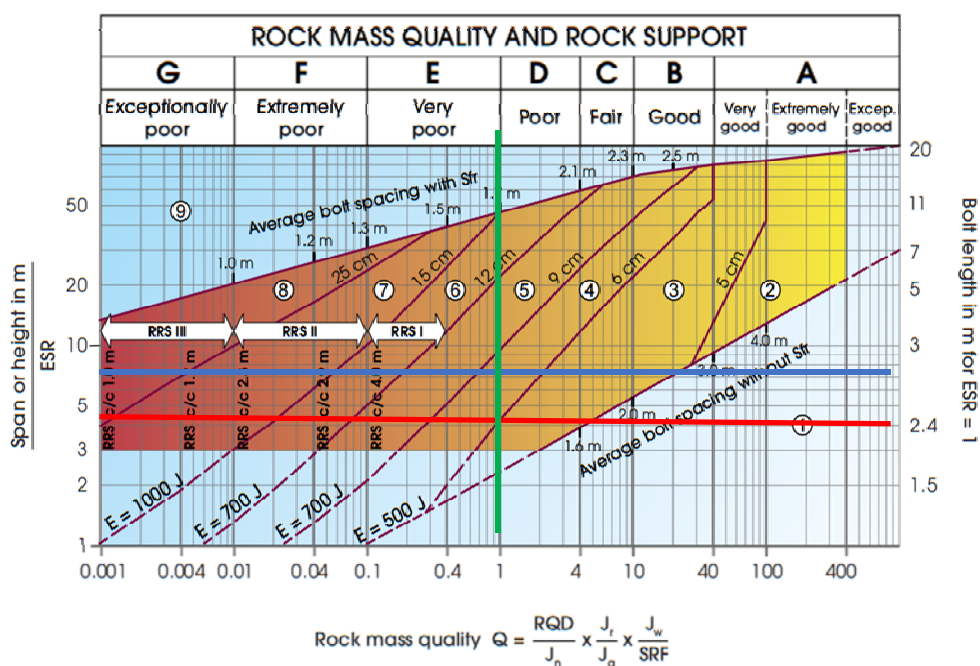
Ø16 = Rebar diameter is 16 mm

c/c = RSS spacing, centre - centre

Kuva 1-31. Q-lujitustaulukon nomogrammin lujitukset.

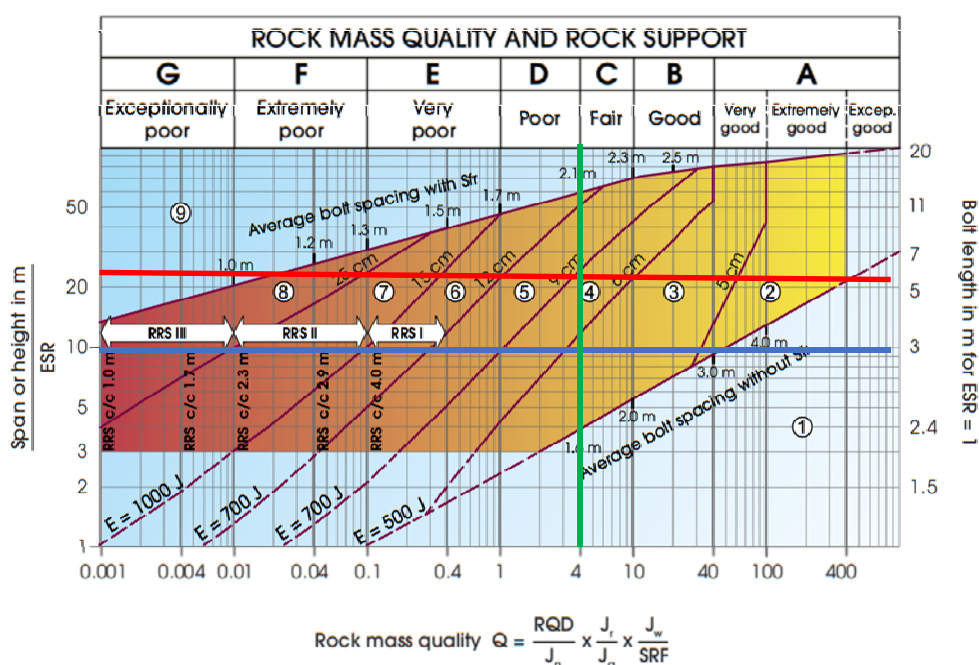
Esimerkki 1-1 Ei risteysaluetta, normaali kattopaksuus

ESR 1,3	
seinäkorkeus/ESR = 6,2 (8,0/1,3)	(nomogrammissa sininen viiva)
tunnelin leveys/ESR = 4,2 (5,5/1,3)	(nomogrammissa punainen viiva)
kalliolaatu heikko	(nomogrammissa vihr. viiva, valitaan vaihteluvälin pahimman (Q=1) mukaan)
taulukon mukainen lujitus	Systemaattinen pultitus, pultti B500B Ø20 mm #1700, seinä L3100 holvi L3500 Systemaattinen kuituvahvistettu ruisku-betonointi E500, seinät 60 mm ja holvi 80 mm.



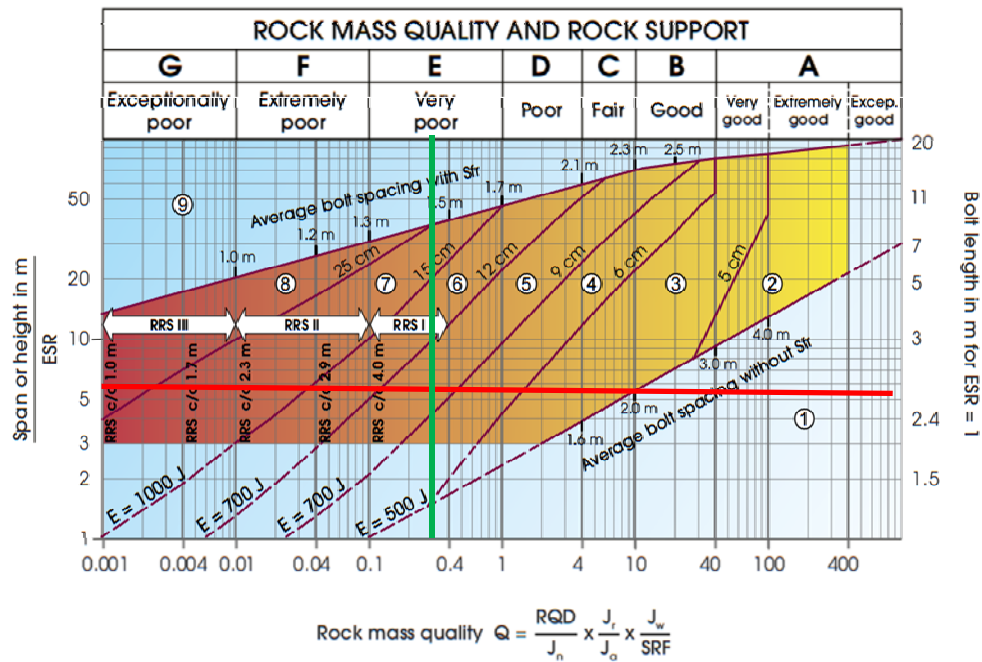
Esimerkki 1-2 Ei risteysaluetta, normaali kattopaksuus

ESR 1	Ei risteysaluetta, normaali katto- paksuus
seinäkorkeus/ESR = 10 (10)	(nomogrammissa sininen viiva)
tunnelin leveys/ESR = 25 (25)	(nomogrammissa punainen viiva)
kalliolaatu kohtalainen	(nomogrammissa vihr. viiva, valitaan vaihteluvälin pahimman (Q=4) mukaan)
taulukon mukainen lujitus	Systemaattinen pultitus, pultti B500B Ø20 mm #2100, seinä L3000 holvi L5500 Systemaattinen kuituvahvistettu ruisku- betonointi E500, seinät 60 mm ja holvi 90 mm.



Esimerkki 1-3 Risteysaluetta, normaali kattopaksuus

ESR 1,3	
seinäkorkeus/ESR = 6,2 (8/1,3)	(nomogrammissa punainen viiva)
tunnelin leveys/ESR = 6,2 (8/1,3)	(nomogrammissa punainen viiva)
kalliolaatu heikko	Risteysalueella $J_n = J_n' \times 3$ (nomogrammissa vihr. viiva, valitaan vaihteluvälin pahimman ($Q=1$) mukaan) --> Lujituksissa $Q = 0,33$
taulukon mukainen lujitus	Systemaattinen pultitus, pultti B500B Ø20 mm #1400, seinä L3300 holvi L3300 Systemaattinen kuituvahvistettu ruisku-betonointi E700, seinät ja holvi 100 mm



Esimerkki tunnelin injektointikriteerin asettamisesta

Esimerkkilasku Thiemin kaivoyhtälöllä:

- Lähtötiedot:
 - o Tunnelin pituus 350 metriä
 - o Tunnelin vieressä sijaitseva pohjavesialueen vedenpinnalle sallittu pudotus on määritelty pohjavesimallinnuksella niin, että tunneliin saa vuotaa pohjavesialueelta enintään 13 litraa minuutissa.
 - o Tunnelin pumppausjärjestelyt on mitoitettu 567 litralle/h
 - o Pohjaveden painekorkeus tunnelin tasalla 15 m
 - o Tunnelin poikki-pinta-ala 35 m²
 - o Tunnustelureiän halkaisija 54 mm
 - o Tunnustelureiän pituus 20 m
- Laskentaoletukset:
 - o Tunnustelureiät kuvaavat riittävästi tunnelia ympäröivää kalliomassaa
 - o Skin-kerroin nolla (0) eli sitä ei huomioida.
- Laskenta:
 - o Sallittu vuotovesimäärä:
 - toiminnallisesta mitoituksesta laskettu sallittu vuotovesimäärä on 567 l / 350 m / h eli 2,7 l / min / 100-tunneli-m
 - ympäristöstä johtuva sallittu vuotovesimäärä on 13 l / 350 m / min eli 3,7 l/min
 - toiminnallisen mitoituksen perusteella laskettu suurin sallittu vuotovesimäärä on pienempi eli määrääväksi valitaan 2,7 l / min / 100-tunneli-m
 - o tunnelin poikkipinta-alaa vastaavan ympyrän säde on $35 \text{ m} / \pi / 2 = 5,57 \text{ m}$
 - o Muodostetaan Thiemin yhtälö kaavalla (4) sekä tunnustelureiälle että tunnelille. Muodostetaan molemmista kaavoista yhtälöpari. Yhtälöparille tehtävien supistusten jälkeen saadaan tunnustelureiän sallituksi vuotovesimääräksi (tarkastelujakson pituus 100 m):

$$Q_{\text{tunnustelureikä}} = \frac{2,7 \text{ l / min} \ln\left(\frac{2 \times 15 \text{ m}}{0,027 \text{ m}}\right)}{\ln\left(\frac{2 \times 15 \text{ m}}{5,57 \text{ m}}\right)} = 11,245 \text{ l / min}$$

- o Lasketaan vuotovesimäärää vastaava, kallion vedenjohtokykyä kuvaava Lugeon-arvo:

$$Lug = \frac{11,245 \text{ l / min}}{100 \text{ m} * 1 \text{ min} * 0,15 \text{ MPa}} = 0,75 \text{ Lug}$$

- Raja-arvon määrittäminen työmaalla tehdään tunnustelurei'istä tehtävissä vesimenekikokeissa. Vesimenekikokeet tehdään by53/2016 mukaisesti ja reikäkoh- tainen mittausaika on vähintään 5 minuuttia. Mittausajan pidentäminen parantaa tulokset tarkkuutta. Paras mittaustulos saadaan käyttämällä eri painesarjoja ja tul- kitsemalla tulokset by53/2016:n mukaan.

- Edellä kuvatun yksinkertaistetun laskennan tunnistettuja ns. heikkoja kohtia:
 - o Oletetaan, että kalliomassa on homogeeninen tarkastelualueella.
 - o Ei ota huomioon tunnustelureiän todennäköisyyttä osua injektoitaviin rakoihin eli olettaa, että tunnustelureikää lävistävien rakojen summatransmissiviteetti kuvaa mittakaavan logaritmisessa suhteessa tunnelia.
 - o Yleisesti koko tunnustelureikäkäytäntö ei välttämättä kuvaa riittävästi alueen rakoilun vedenjohtokykyä, sillä todellisuudessa erilliset rako-systeemit toimivat stokastisina muuttujina. Luotettavuutta voidaan parantaa poraamalla viuhkaan useampia tunnustelureikiä eri suuntaisina.
 - o Todellisuudessa pumppausjärjestelyt mitoitetaan vuotomäärien mukaan eikä toisinpäin, kuten tässä esimerkissä on sen havainnollistettavuuden johdosta esitetty.

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-602-7
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto